



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OBRÁBĚNÍ KOBALTOVÉ SLITINY UMC050**

MACHINING OF THE COBALT ALLOY UMC050

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Peter Prno**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**

**BRNO 2021**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Peter Prno**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Obrábění kobaltové slitiny UmCo50

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na experimentální metody. Předpokládá volbu testovaných materiálů se zaměřením na slitinu UMCo50, výrobu vzorků pro případné mechanické testy či testy obrobitelnosti s následným měřením a vyhodnocením experimentu. Součástí práce bude, jak řešerše problematiky kobaltových a obdobných slitin, tak experiment zaměřený na obrobitelnost zvoleného materiálu. Výsledkem by měly být závislosti opotřebení na čase k získání Taylorovi závislosti pro zvolený řezný materiál.

### Cíle diplomové práce:

- Teoretický rozbor tématiky.
- Sestavení experimentální části.
- Provedení experimentů.
- Zhodnocení výstupů.
- Doporučení autora.

### Seznam doporučené literatury:

- KLARSTROM, D. a D. KLARSTROM. Metallography and Microstructures of Cobalt and Cobalt Alloys. 9. 2004. ISBN 0871707063. Dostupné také z: <http://search.proquest.com/docview/28264608/>
- DAVIS, J. R. (Joseph R.). ASM speciality handbook: Nickel, cobalt, and their alloys. Materials Park: ASM International, 2000, 442 s. : il. ; 29 cm. ISBN 978-0-87170-685-0.
- ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.

CHLADIL, J. Teorie obrábění. 3. přeprac. vyd. Brno: VUT, 1989. 193 s. ISBN 65-137-2224-0.

ŠTULPA, M. CNC obráběcí stroje. Praha: BEN, 2006. 128 s. ISBN 80-7300-207-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá tematikou obrobitel'nosti materiálov. V teoretickej časti sú popísané aspekty, podľa ktorých obrobitel'nosť možno hodnotiť. Materiálová stránka práce je zameraná na rôzne druhy ťažkoobrobitel'ných materiálov. Do tejto skupiny je možné zaradiť aj kobaltovú zliatinu UmCo50, ktorá je predmetom experimentálnej časti. Jedná sa o zliatinu pre vysokoteplotné použitie. Primárnou úlohou bolo sledovanie opotrebenia zvoleného rezného nástroja pri sústružení tejto zliatiny. Taktiež boli sledované ďalšie hľadiská zvoleného obrábacieho procesu, ako silové účinky, prípadne kvalita obrobenej plochy. Vzhľadom na to, že obrobitel'nosť testovaných materiálov nemožno vyjadriť prostredníctvom absolútnej hodnoty nejakej veličiny, je nutné jednotlivé aspekty obrábacích procesov porovnávať pomocou referenčných materiálov. Je potrebné však dodržať určité podmienky tohto porovnania. Na základe toho bolo zrealizované aj porovnanie testovaného a referenčného materiálu.

## Kľúčové slová

testovanie trvanlivosti, sústruženie spekaným karbidom, UmCo50, kobaltová zliatina, meranie rezných síl, obrobitel'nosť

## ABSTRACT

The diploma thesis deals with the topic of machinability of materials. The theoretical part describes the aspects according to which machinability can be evaluated. The material side of the thesis is focused on various types of difficult-to-machine materials. The cobalt alloy UmCo50 belongs to the group of difficult-to-machine materials and it is the subject of the experimental part. UmCo50 is an alloy for high temperature use. The primary aim of the thesis was to monitor the wear of the selected cutting tool when turning this alloy. Other aspects of the selected machining process were also monitored, such as force effects or the quality of the machined surface. Despite the fact that machinability of tested materials cannot be expressed in terms of the absolute value of a quantity, it is necessary to compare the various aspects of the machining processes by reference materials. However, certain conditions of this comparison must be met. Based on this, a comparison of tested and reference material was performed.

## Key words

tool-life testing, turning with sintered carbide, UmCo50, cobalt-based alloy, cutting forces measure, machinability



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

PRNO, Peter. *Obrábění kobaltové slitiny UmCo50* [online]. Brno, 2021 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132228>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.

### **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému „Obrábění kobaltové slitiny UmCo50“ vypracoval samostatne, pod vedením Ing. Oskara Zemčíka, Ph.D., s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname použitých zdrojov.

---

Dátum

.....  
Bc. Peter Prno

## POĎAKOVANIE

Týmto by som sa chcel poďakovať vedúcemu mojej diplomovej práce Ing. Oskarovi Zemčíkovi, Ph.D. za jeho cenné rady a pripomienky pri riešení zvolenej problematiky.

Za zabezpečenie testovacieho materiálu patrí vďaka vedeniu ÚST-odboru zlievarenstva, osobitne doc. Ing. Antonínovi Záděrovi, Ph.D. .

Rovnako by som sa chcel poďakovať aj Janovi Pokornému a Jiřímu Čechovi za pomoc pri realizácii experimentálnej časti v dielni ÚST-odboru obrábania, a taktiež spoločnosti UP-Steel, s.r.o. za pomoc pri realizácii experimentu s referenčným materiálom.

V neposlednom rade patrí vďaka aj mojej rodine za možnosť štúdia na vysokej škole a priateľom za podporu počas štúdia.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
ČESTNÉ PREHLÁSENIE .....	6
POĎAKOVANIE .....	7
OBSAH.....	8
ÚVOD.....	10
1 POSUDZOVANIE KOVOVÝCH MATERIÁLOV Z POHLADU OBRÁBACIEHO PROCESU.....	11
1.1 Obrobiteľnosť .....	11
1.1.1 Označovanie obrobiteľnosti materiálov .....	12
1.1.2 Skúšky obrobiteľnosti .....	13
1.2 Aspekty ovplyvňujúce obrobiteľnosť materiálu .....	17
1.3 Dôsledky rozdielnej obrobiteľnosti .....	18
1.3.1 Zmena rezných podmienok.....	18
1.3.2 Kvalita obrobenej plochy .....	19
1.3.3 Trieska .....	20
1.3.4 Silové pôsobenie .....	21
1.3.5 Teplota pri obrábaní.....	22
2 ŤAŽKO OBRÁBATEĽNÉ MATERIÁLY.....	23
2.1 Rozdelenie materiálov obrobkov .....	23
2.2 Nehrdzavejúce ocele .....	24
2.3 Titánové zliatiny .....	26
2.4 Niklové zliatiny.....	28
2.5 Kobaltové zliatiny.....	30
2.5.1 Kobaltové zliatiny s odolnosťou voči opotrebeniu.....	31
2.5.2 Kobaltové zliatiny pre vysokoteplotné použitie .....	32
2.5.3 Kobaltové zliatiny s odolnosťou voči korózii od roztokov a opotrebeniu ....	33
3 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY .....	35
3.1 Druhy rezných materiálov .....	35
3.2 Spekané karbidy.....	35
3.3 Formy opotrebenia rezných materiálov .....	37
4 NÁVRH EXPERIMENTÁLNEJ ČASTI .....	39
4.1 Špecifikácia obrábacieho stroja a technológie.....	39
4.2 Špecifikácia obrábacieho nástroja a rezných podmienok .....	39
4.2.1 Vymeniteľná rezná doštička a držiak .....	39
4.2.2 Voľba rezných podmienok .....	41
4.3 Špecifikácia obrobku .....	41

4.3.1 Příprava vzorky pre experiment.....	42
4.3.2 Vlastnosti testovaného materiálu .....	43
4.4 Špecifikácia meraných parametrov .....	45
4.5 Meracie príslušenstvo .....	46
5 VÝSTUPY EXPERIMENTÁLNEJ ČASTI.....	47
5.1 Sledovanie opotrebenia rezného nástroja v čase.....	47
5.1.1 Závislosť $T-v_c$ .....	52
5.2 Silové pôsobenie nástroja .....	54
5.2.1 Merná rezná sila.....	57
5.3 Meranie parametru $R_a$ .....	58
6 DISKUSIA.....	60
6.1 Návrh pre ďalšie skúmanie .....	61
ZÁVER .....	62
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....	63
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	66
ZOZNAM PRÍLOH.....	69

## ÚVOD

V technickej praxi možno pozorovať neutíchajúci trend vo vývoji nových, pokročilejších materiálov. Tieto materiály často kombinujú aj protichodné vlastnosti. Výhody týchto materiálov v ich aplikáciách bývajú nesporné, avšak nie vždy je možné tieto materiály použiť, vzhľadom na ekonomické hľadisko. Trend, ktorý možno pozorovať u väčšej časti producentov za posledné roky v oblasti techniky je redukcia výrobných nákladov, s cieľom navýšenia zisku. Nie vždy je však táto filozofia na mieste, pretože úspora výrobných nákladov sa často realizuje prostredníctvom použitia lacnejších, menej kvalitných materiálov. To má samozrejme dopad na kvalitu výsledného produktu a tak dochádza k skracovaniu jeho životnosti. S prihliadnutím na stále častejšie otváranie témy ekológie a možných klimatických zmien, je tento trend scestný. Z hľadiska ekológie je žiadúce vyrábať kvalitnejšie produkty a aj prostredníctvom modernejších, kvalitnejších materiálov navyšovať ich životnosť, aby po krátkej dobe neskončili ako odpad, ale naďalej slúžili zákazníkom.

Materiál, ktorý je predmetom tejto diplomovej práce (kobaltová zliatina UmCo50) nie je priveľmi rozšírený. Svedčili o tom aj značne obmedzené poznatky z dostupnej literatúry, počas vypracovávania. Experimentálne zistené poznatky z tejto práce môžu prispieť ku ľahšiemu uskutočneniu ďalších skúmaní vlastností alebo aj nájdeniu nových aplikácií tejto zliatiny, kde bude tvoriť kvalitnejšiu alternatívu, oproti doposiaľ používanému materiálu.

Z pohľadu obrábacieho procesu, kobaltové zliatiny, ale aj iné ťažkoobrobiteľné materiály tvoria veľmi špecifickú skupinu. Ide o pomerne drahé materiály, avšak ich výnimočné vlastnosti umožňujú také použitia, kde ostatné materiály zlyhávajú. Nie len ich samotné obrábanie je náročné (ako už napovedá samotný názov – ťažkoobrobiteľné), ale aj akékoľvek iné spracovanie, ako napríklad tavba, tvárnenie, či zváranie. Akékoľvek nové poznatky z problematiky ťažkoobrobiteľných materiálov môžu byť preto veľmi prínosné.

# 1 POSUDZOVANIE KOVOVÝCH MATERIÁLOV Z POHLĎADU OBRÁBACIEHO PROCESU

Táto rozsiahla kapitola je zameraná na sledovanie procesu trieskového obrábania z hľadiska použitia rozdielnych materiálov obrobkov. Zmena obrábaného materiálu sa zákonite musí prejavíť v zmenu celého radu parametrov, či už sú to vstupné alebo výstupné parametre. Tieto zmeny je potrebné predikovať.

## 1.1 Obrobiteľnosť

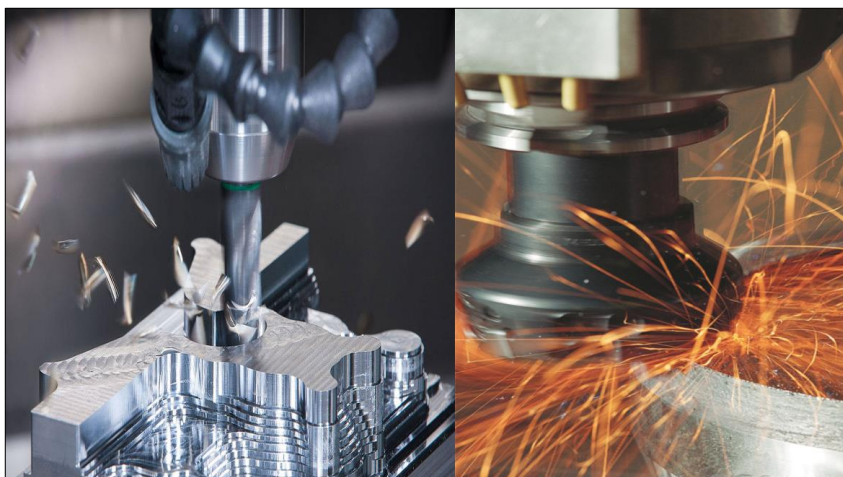
Ide o základnú vlastnosť materiálu obrobku, ktorá slúži ako vstup do obrábacieho procesu. Možno ju definovať ako vhodnosť konkrétneho materiálu k rezaniu. Prejavuje sa na kvalite obrábaného povrchu, vzniknutom teple pri obrábaní, obrábacích silách, otupení nástroja, tvare a veľkosti triesky, akustike a podobne. Súhrn všetkých týchto parametrov sa samozrejme premietne do finančnej stránky. Pri pohľade na daný obrábací proces možno v niektorých prípadoch už na prvý pohľad odhadnúť obrobiteľnosť (viď obr. 1.1). Obrobiteľnosť konkrétneho obrábaného materiálu je viazaná predovšetkým na (viď aj obr. 1.6):

- chemické zloženie,
- mechanické vlastnosti,
- tepelné spracovanie,
- technológia výroby,
- teplota,
- podmienky pri rezaní (rezné podmienky, druh obrábania, nástroj).

V odbornej literatúre sa možno stretnúť s pojmami absolútna a relatívna obrobiteľnosť. Absolútna obrobiteľnosť by sa dala stanoviť napr. veľkosťou obrobenej plochy určitej kvality v  $\text{cm}^2$ , za určitých, konštantných rezných podmienok. Nastáva tu však problém s trvanlivosťou nástroja, pretože s každou zmenou obrábaného materiálu by bola iná aj trvanlivosť. Výsledky by teda neboli objektívne. Vzhľadom na to, je vhodnejšie realizovať skúšky obrobiteľnosti relatívnej, kde sa výstupy obrábacieho procesu porovnávajú s referenčným materiálom – etalónom, za konštantných rezných podmienok (posuv, hĺbka záberu hlavného ostria, rezná rýchlosť, prípadne iné). Sledované veličiny môžu byť buď absolútne (napr. rezné sily, rezné momenty, celková potrebná práca na obrobenie určitej plochy, teplota rezania, tvar a veľkosť triesky), alebo merné (napr. merné rezné sily alebo krútiace momenty, súčinitele trenia na čele alebo chrbte, intenzita opotrebenia reznej hrany). Skúmanie absolútnych veličín, najmä síl, momentov a práce, pomerne dobre slúži pre dimenzovanie a návrh obrábacích nástrojov a strojov. Pre určovanie obrobiteľnosti materiálu obrobkov sa zdá najvhodnejšou a najobjektívnejšou možnosťou sledovať intenzitu opotrebenia reznej hrany nástroja, v súvislosti s hodnotou reznej rýchlosti. Tiež je dôležité poznamenať, že obrobiteľnosť konkrétneho obrábaného materiálu sa líši v závislosti od použitej technológie obrábania. Testy obrobiteľnosti je teda potrebné realizovať pre jednotlivé technológie samostatne. [1]

Relatívna obrobiteľnosť sa vyhodnocuje pomerom sledovanej veličiny skúšaného materiálu obrobku ku materiálu etalónu. Ide teda o bezrozmernú veličinu. Pri sledovaní obrobiteľnosti z hľadiska intenzity opotrebenia reznej hrany v súvislosti s reznou rýchlosťou sa využíva najčastejšie tzv. index obrobiteľnosti, ktorý možno vyjadriť pomocou nasledujúceho vzťahu [2]:

$$K_v = \frac{v_{cT(TM)}}{v_{cT(RM)}} \quad (1.1)$$



Obr. 1.1 Rozdiel medzi obrábaním materiálu s dobrou obrobitelnosťou a prípadom opačným [3; 4].

### 1.1.1 Označovanie obrobitelnosti materiálov

Pre prehľadnejšie vyjadrenie obrobitelností jednotlivých technických materiálov boli materiály rozdelené do niekoľkých skupín [5]:

- skupina a – liatiny,
- skupina b – ocele,
- skupina c – ťažké neželezné kovy a zliatiny,
- skupina d – ľahké neželezné kovy a zliatiny,
- skupina e – plastické hmoty,
- skupina f – prírodné nerastné hmoty,
- skupina g – vrstevné hmoty,
- skupina h – gumeny.

Z týchto skupín sú pre technickú prax najdôležitejšie skupiny a-d. Z každej skupiny bol vybraný jeden materiál, ktorý pre danú skupinu figuruje ako etalónový materiál. S ním sú porovnávané hodnoty sledovaných veličín relatívnej obrobitelnosti všetkých testovaných materiálov.

Triedu obrobitelnosti však vyjadruje číslo v rozsahu 1–20, umiestnené ešte pred samotným písmenom. Kompletne označenie má teda tvar napr. 15a, 10b alebo 7d. Význam čísiel je zavedený tak, že so stúpajúcou hodnotou sa zlepšuje obrobitelnosť (kvalitný obrobený povrch pri nižších rezných silách a momentoch, teplotách obrábania, lepšom tvare triesky a vyššej trvanlivosti nástroja), a naopak. Rozdiely medzi jednotlivými triedami určuje geometrický rad. Pomer dvoch susedných hodnôt je definovaný tzv. kvocientom (podľa celoštátneho normatívu CNN 10-0-I/II z roku 1977 [6], je  $k = 10^{1/10} = 1,26$ ). Inak povedané, pri materiáli obrobku triedy obrobitelnosti napr. 2, možno použiť 1,26-krát vyššiu reznú rýchlosť, pri danej trvanlivosti ( $v_{cT}$ ), ako u materiálu triedy obrobitelnosti 1. Porovnávať výsledky možno však iba pre konkrétnu rezivosť nástroja (geometria a materiál nástroja). [2]

Tento, aj ostatné prípady, pre skupiny materiálov a-d sú uvedené v tabuľke 1.1



Tab. 1.1 Hodnoty indexu obrábiteľnosti pre materiály skupín a–d, etalónové mat. skupín [7].

Index obrábiteľnosti $K_v$			Trieda obrábiteľnosti pre materiál obrobku			
Vyjadrenie pomocou kvocientu	Stredná hodnota	Rozmedzie	Liatiny	Ocele	Ťažké neželezné kovy – zliatiny Cu	Ľahké neželezné kovy – zliatiny Al
$1,26^{-13}$	0,05	0,045–0,054	–	1b	–	–
$1,26^{-12}$	0,065	0,055–0,069	–	2b	–	–
$1,26^{-11}$	0,08	0,070–0,089	–	3b	–	–
$1,26^{-10}$	0,10	0,09–0,11	–	4b	–	–
$1,26^{-9}$	0,13	0,12–0,14	1a	5b	2c	–
$1,26^{-8}$	0,16	0,15–0,17	2a	6b	3c	–
$1,26^{-7}$	0,20	0,18–0,22	3a	7b	4c	–
$1,26^{-6}$	0,25	0,23–0,28	4a	8b	5c	4d
$1,26^{-5}$	0,32	0,29–0,35	5a	9b	6c	5d
$1,26^{-4}$	0,40	0,36–0,44	6a	10b	7c	6d
$1,26^{-3}$	0,50	0,45–0,56	7a	11b	8c	7d
$1,26^{-2}$	0,63	0,57–0,71	8a	12b	9c	8d
$1,26^{-1}$	0,80	0,72–0,89	9a	13b	10c	9d
$1,26^0$	1,00	0,90–1,12	10a	14b	11c	10d
$1,26^1$	1,26	1,13–1,41	11a	15b	12c	11d
$1,26^2$	1,59	1,42–1,78	12a	16b	13c	12d
$1,26^3$	2,00	1,79–2,24	13a	17b	14c	13d
$1,26^4$	2,50	2,25–2,82	14a	18b	15c	14d
$1,26^5$	3,15	2,83–3,55	–	19b	–	15d
$1,26^6$	4,00	3,56–4,47	–	20b	–	16d
Etalónový materiál [1]			Sivá liatina nelegovaná (ČSN 42 2420; tvrdosť 190 HB)	Uhlíková oceľ (ČSN 41 2050.1; tvrdosť 190 HB)	Automatová mosadz tvárnená za tepla (ČSN 42 3213.21; tvrdosť 90 HB)	Tvárnená zliatina hliníku, vytvrdená (ČSN 42 4380.11; tvrdosť 100 HB)

### 1.1.2 Skúšky obrábiteľnosti

V technickej praxi sú využívané dva druhy skúšok obrábiteľnosti. Prvú skupinu reprezentujú tzv. krátkodobé skúšky. Zaberajú pomerne málo času a majú dostatočnú výpovednú hodnotu. Nespornou výhodou je aj ekonomická stránka – nie je potrebné také množstvo testovacieho materiálu ako u dlhodobých skúšok, kde je spotreba materiálu značná. Krátkodobé skúšky nachádzajú uplatnenie napríklad: rýchla kontrola obrábiteľnosti pri opakovaných tavných rovnakého materiálu, rýchla kontrola obrábiteľnosti pri doplnení zásob materiálu do výroby alebo pre promptné rozčlenenie skupiny viacerých materiálov podľa vhodnosti k obrábaciemu procesu. Dlhodobé skúšky reprezentuje vlastne iba jedna skúška – zostrojenie závislosti  $T = \text{funkcia}(v_c)$ . Táto skúška má vysokú výpovednú hodnotu a posudzuje sa ňou aj objektívnosť krátkodobých skúšok. Negatívnou stránkou tejto skúšky je jej časová náročnosť a potreba značného množstva testovaného materiálu. [2]

### Skúška pri zníženej miere opotrebenia

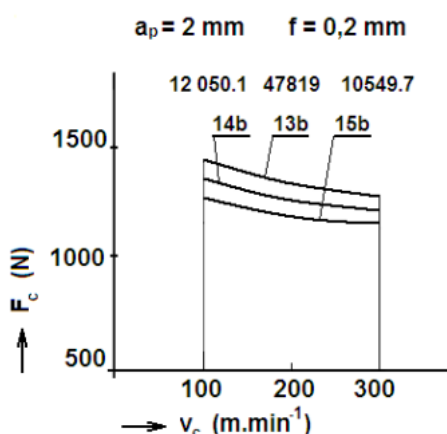
Ide o priamu, krátkodobú metódu skúšania. Je analogická s dlhodobou skúškou obrobitelnosti (vid' nižšie). Realizuje sa obrábaním (napr. pozdĺžnym sústružením) a vyhodnocuje sa intenzita opotrebenia nástroja v kontexte s reznou rýchlosťou. Čas obrábania sa tu však skracuje na cca 5 minút a taktiež sa redukuje kritická miera opotrebenia  $VB_B$  (0,1–0,3 mm). Týmto redukciami sa však zhoršuje výpovedná hodnota indexu obrobitelnosti. Ďalšia možnosť pre redukciiu je aj zníženie rezivosti nástroja pomocou patričného tepelného spracovania a tým sa zabezpečí jeho rýchlejšia degradácia. Naopak, možno použiť aj zvýšenie parametru – reznej rýchlosti, čím sa tiež zabezpečí krátkodobosť skúšky. [2]

### Čelná skúška

Ide taktiež o priamu, krátkodobú metódu skúšania. Spočíva v čelnom sústružení disku s otvorom v osi. Vonkajší priemer disku a priemer otvoru v osi sú vopred stanovené, rovnako ako otáčky pri sústružení. Posuv a hĺbka záberu hlavného ostria musia byť pri skúške samozrejme nemenné. Sústruženie čelnej plochy prebieha od otvoru smerom ku vonkajšiemu priemeru. Meranou veličinou je priemer, resp. rezná rýchlosť, pri ktorej dosiahne nástroj vopred stanoveného opotrebenia. Výstupom je komparácia rezných rýchlostí (podobne ako vzťah 1.1). [2]

### Dynamická metóda

Táto priama metóda zisťovania obrobitelnosti je založená na fakte, že materiály s horšou obrobitnosťou, pri konštantných rezných podmienkach vykazujú vyššie hodnoty merného rezného odporu. Toto tvrdenie je predpokladané teoreticky a potvrdzujú ho aj praktické experimenty. Pomocou dlhodobých skúšok obrobitelnosti možno pre etalón a ďalšie testované vzorky zostrojiť tzv. diagramy, pomocou ktorých sa dá určiť obrobitnosť materiálu novo-testovaného, za relatívne veľkých časových a finančných úspor (použitím krátkodobej skúšky). Pre tento účel veľmi dobre slúži závislosť  $F_c = \text{funkcia}(v_c)$  (obr. 1.2). Tieto závislosti musia byť zostrojované za stálych rezných podmienok a dôsledne dodržiavaných ostatných parametrov. Postupy sú upravené aj príslušnou normou. [2]



Obr. 1.2 Vzťah medzi dominantnou zložkou reznej sily ( $F_c$ ) a reznou rýchlosťou [2].

### Leyensetterova skúška

Leyensetterova skúška je nepriama metóda zisťovania obrobiteľnosti a je veľmi podobná skúške Charpyho kladivom. Skúška sa však nerealizuje pomocou kladiva ale pomocou noža, inštalovaného do meracieho zariadenia. Pozornosť sa upriamuje na rozmery žliabku, vyrytého do skúšaného materiálu. Vyhodnocovaná môže byť buď dĺžka žliabku (rozmer na povrchu) alebo hĺbka vniknutia nástroja. Index obrobiteľnosti sa stanoví analogicky podľa vzťahu 1.1, a to podielom napr. hĺbky vniknutia do skúšaného materiálu ku hĺbke vniknutia do etalónu. [2]

### Teplotná skúška

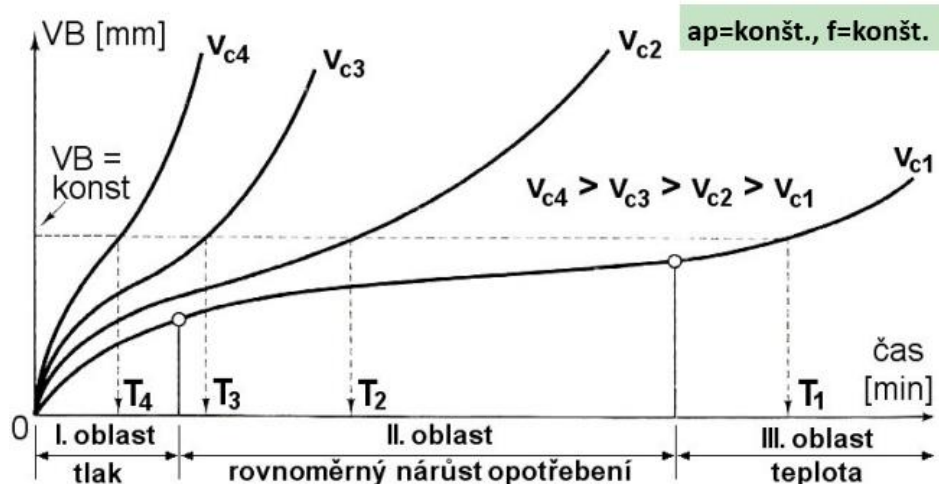
Veľmi dobrú mieru objektivity má ďalšia nepriama skúška obrobiteľnosti – pomocou merania strednej teploty rezania (pomocou tzv. prirodzeného termočlánku). Meranie sa musí realizovať však len v rámci jednej materiálovej skupiny. Odporúča sa skúšať aspoň pri troch rozdielnych hodnotách reznej rýchlosti, ostatné parametre (posuv a hĺbka záberu hlavného ostria) sú samozrejme nemenné. S klesajúcou strednou teplotou rezania sa obrobiteľnosť zlepšuje. [2]

### Skúška za konštantnej sily posuvu

Posledným príkladom z radu nepriamych skúšok je skúška, ktorá sa realizuje vŕtaním do predvŕtanej diery, za konštantnej hodnoty sily posuvu. Ostatné parametre ako dohodnutý priemer vrtáku, priemer predvŕtanej diery a rezná rýchlosť, musia pri testovaní etalónu aj skúšobnej vzorky byť opäť jednotné. Index obrobiteľnosti sa určuje pomerom dosiahnutých hodnôt posuvu. [1]

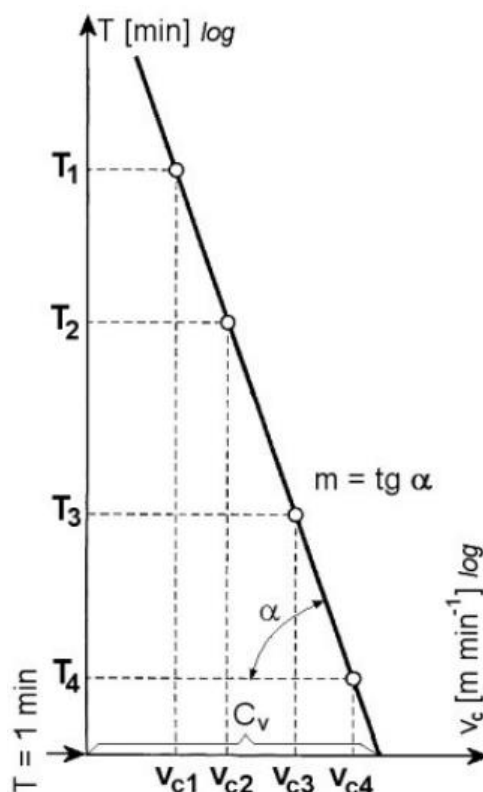
### Dlhodobá skúška obrobiteľnosti

Realizuje sa obrábaním (najčastejšie sústružením alebo frézovaním) konkrétneho materiálu obrobku s nástrojom definovaným svojou geometriou a materiálom. Rovnako ako u vyššie popísaných skúšok, aj tu platí pravidlo konštantných rezných podmienok ( $f$ ,  $a_p$ , príp. použitie procesných kvapalín). Skúška sa zaoberá sledovaním opotrebenia. Vo väčšine prípadov ide o opotrebenie VB (viď nižšie) nástroja v čase – intenzita opotrebenia za rozdielnych hodnôt reznej rýchlosti  $v_c$ . Obrábať sa odporúča uskutočniť aspoň 4 rôznymi testovacími reznými rýchlosťami. Vzniká tak závislosť VB = funkcia ( $t$ ) (obr. 1.3).



Obr. 1.3 Závislosť opotrebenia nástroja VB na čase [7].

Ďalšie aspekty tejto skúšky upravuje aj platná norma ISO 3685. Zaoberá sa aj napríklad voľbou rezných rýchlostí pre vhodné (rovnomé) rozmiestnenie bodov  $[v_{ci}; T_i]$ , kde  $i = 1$  až  $n$ , na zostrojenie závislosti  $T = \text{funkcia}(v_c)$ . V ďalšej fáze je potrebné stanoviť konštantnú, kritickú hodnotu opotrebenia, ktorá má väčšinou hodnotu  $VB = 0,3$  mm. Sledovanie intenzity opotrebenia sa dá aj prostredníctvom parametru  $KT$  (popis – viď nižšie). Jeho priebeh máva exponenciálny tvar a jeho limitná hodnota sa taktiež pohybuje v rozsahu ( $KT = 0,2\text{--}0,3$  mm). Po stanovení kritickej hodnoty opotrebenia je možné pristúpiť k odčítaniu bodov  $[v_{c1-n}; T_{1-n}]$ , ktoré sú vynesené do grafu  $T = \text{funkcia}(v_c)$  – obr. 1.4 a to v logaritmických súradniciach. Práve z tejto regresívnej, lineárnej závislosti bol odvodený tzv. Taylorov vzťah (vzťah 1.6). Pre konkrétnu trvanlivosť (napr.  $v_{c12}$  alebo  $v_{c15}$ ) je tak následne možné stanoviť index obrábiteľnosti podľa vzťahu 1.1. [2; 7]



Obr. 1.4 Závislosť trvanlivosti na rezných rýchlostiach [7].

Základný Taylorov vzťah vychádza z rovnice priamky:

$$y = k \cdot x + q, \quad (1.2)$$

ktorá sa dá prepísať do tvaru

$$\log(T) = -m \cdot \log(v_c) + \log(C_T). \quad (1.3)$$

Po odlogaritmovaní vzniká

$$T = v_c^{(-m)} \cdot C_T. \quad (1.4)$$

Konštanta  $C_T$  ale nadobúda relatívne vysoké hodnoty (až  $10^{11}$ ), preto sa pomocou vzťahu [7]

$$C_v = C_T^{(1/m)} \quad (1.5)$$

dá dopracovat' k výslednému Taylorovmu vzťahu [7]

$$v_c = \frac{C_v}{T^{(1/m)}}. \quad (1.6)$$

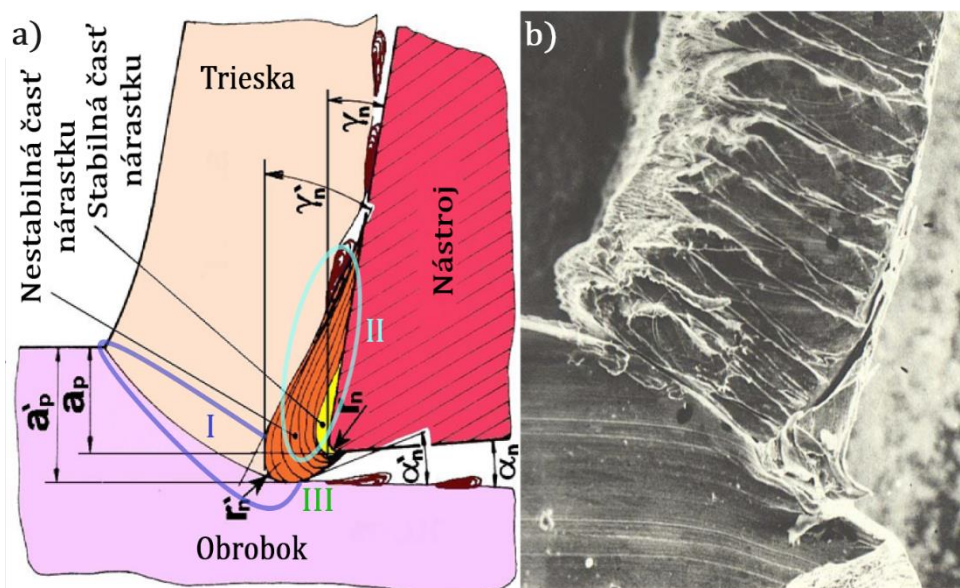
## 1.2 Aspekty ovplyvňujúce obrobiteľnosť materiálu

Jednoznačne najvýznamnejší vplyv na obrobiteľnosť konkrétneho materiálu má jeho chemické zloženie [8]. Obsah jednotlivých prvkov definuje fyzikálne a chemické vlastnosti tohto materiálu a tvorí najpodstatnejší aspekt pre výsledky prípadného tepelného spracovania. Ďalší aspekt, ktorý má taktiež priamy vplyv na obrobiteľnosť je spôsob výroby obrábaného materiálu – v praxi obrábania kovov je to odlievanie, tvárniace operácie, prípadne výroba pomocou aditívnych technológií.

Z teórie obrábania je známe, že pri rezaní – oddeľovaní triesky deformačné procesy prebiehajú zjednodušene v troch oblastiach (viď obr. 1.5):

- oblasť primárnej plastickej deformácie I (oblasť v okolí strižnej roviny, kde sa vyskytujú maximálne šmykové napätia a dochádza k transformácii oddeľovanej vrstvy materiálu na triesku [8]),
- oblasť sekundárnej plastickej deformácie II (oblasť, kde dochádza k vzájomnej interakcii – treniu medzi trieskou a čelom nástroja a tvorbe tzv. nárastku),
- oblasť terciárnej plastickej deformácie III (oblasť, kde dochádza k vzájomnej interakcii medzi obrábaným povrchom a chrbtovou časťou nástroja – opätovnému a konečnému zdeformovaniu obtekajúceho povrchu, čo má najzásadnejší vplyv na kvalitu obrobeného povrchu).

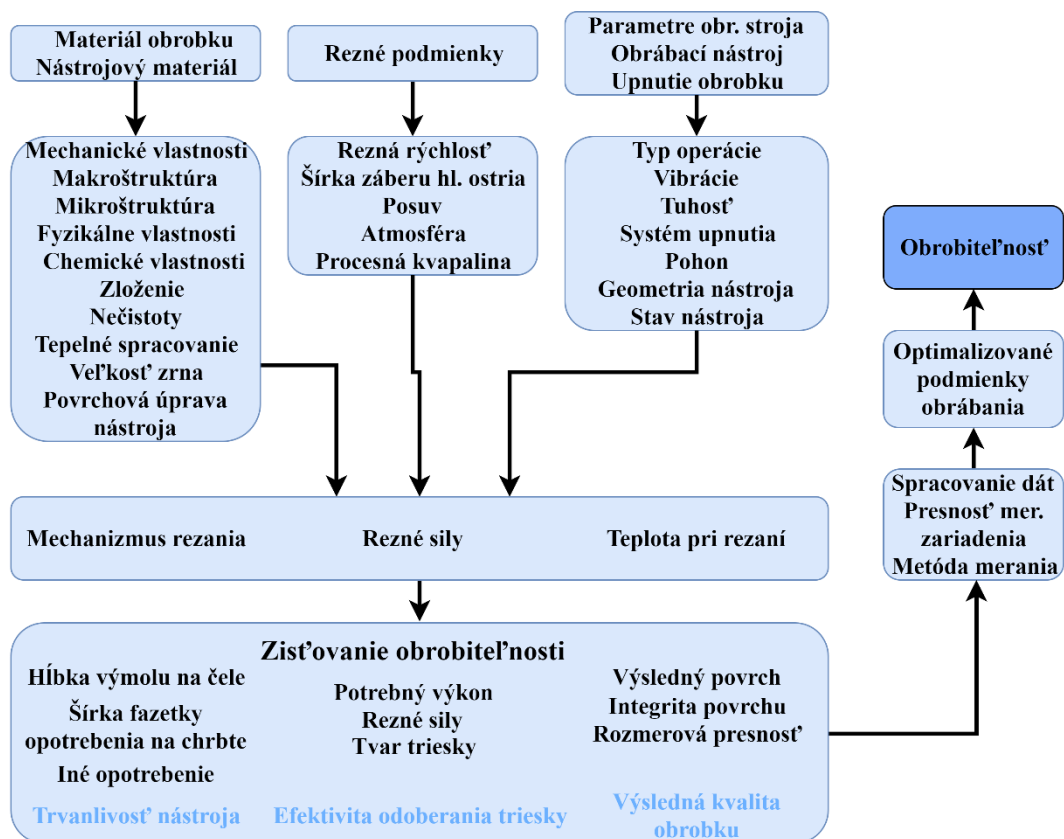
Z pohľadu čo najlepšej odolnosti obrábaného materiálu voči rezaniu je teda jasné, že daný materiál musí disponovať vlastnosťami ako: predovšetkým pevnosť, tvrdosť, húževnatosť, odolnosť voči treniu, tepelná odolnosť, prípadne chemická príbuznosť voči materiálu nástroja.



Obr. 1.5 Pohľad do oblasti koreňa triesky [7]: a) jednotlivé deformačné oblasti a nárastok, b) reálny pohľad do oblasti koreňa triesky.



Obrobiteľnosť je potrebné chápať ako komplexnú vlastnosť, na ktorú má vplyv množstvo aspektov. Diagram na obr. 1.6 znázorňuje väzby najdôležitejších z nich.



Obr. 1.6 Aspekty vstupujúce do procesu zisťovania obrobiteľnosti [9].

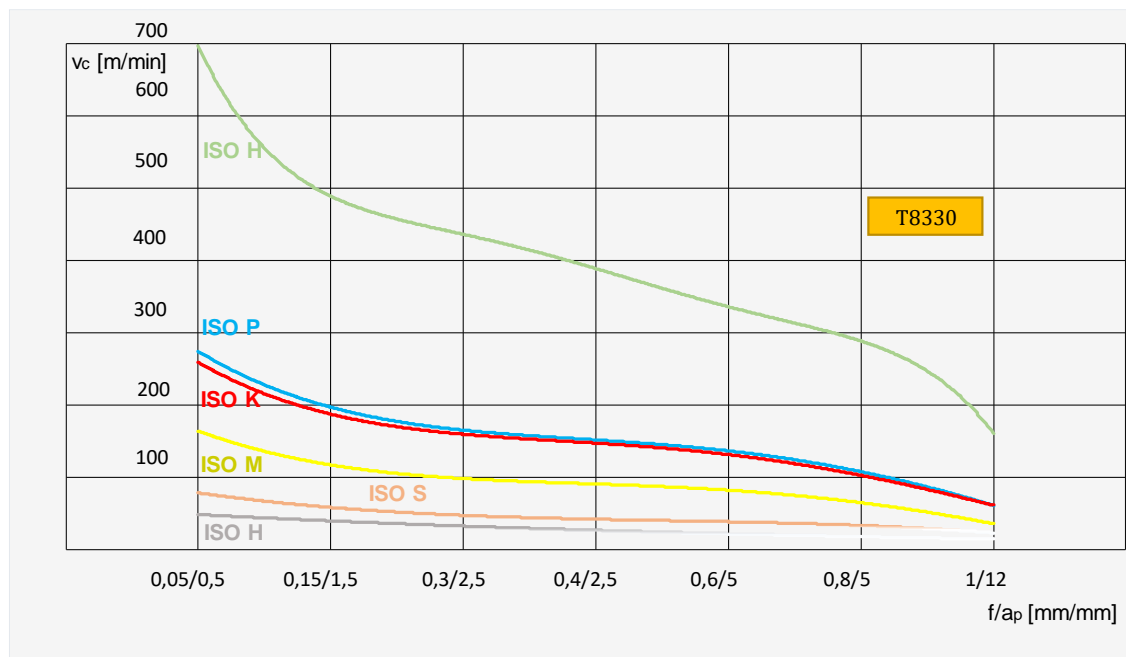
### 1.3 Dôsledky rozdielnej obrobiteľnosti

Experimentálna časť tejto práce je orientovaná výhradne na technológiu sústruženia. Z tohoto dôvodu budú jednotlivé poznatky uvedené v teoretickej časti práce orientované prevažne na technológiu sústruženia.

#### 1.3.1 Zmena rezných podmienok

Základné rezné podmienky pre sústruženie sú:  $v_c$  – rezná rýchlosť,  $a_p$  – šírka záberu hlavného ostria,  $f$  – posuv príp. použitie procesných kvapalín – tzv. chladenia. Pozornosť by mala byť zameraná predovšetkým na reznú rýchlosť, ktorá má najpodstatnejší vplyv na trvanlivosť rezného nástroja (viď aj Taylorova závislosť). Vždy je potrebné hľadať konkrétnu optimálnu hodnotu reznej rýchlosti, pretože sa to môže výrazne premietnuť do ekonomickej stránky procesu z dôvodu častej výmeny nástrojov (prestoje výroby a zvýšená cena za nástroje). Pri analyzovaní vstupných údajov pre návrh parametrov obrábacieho procesu je jedným zo základných údajov materiál obrobku, ktorý je smerodajný pre voľbu reznej rýchlosti. Krivky na obr. 1.7 znázorňujú rádovo v akých hodnotách sa pohybujú rezné rýchlosti pre jednotlivé skupiny materiálov obrobkov (v závislosti na hodnotách  $f$  a  $a_p$ , resp. od dokončovania ku hrubovaniu), pre vybraný nástrojový materiál. Možno z toho vyvodiť záver, že najvyššie hodnoty  $v_c$  sa vo všeobecnosti používajú pre materiály s dobrou obrobiteľnosťou (zliatiny Al a Cu), naopak ťažkoobrobiteľné materiály (tzv. superzliatiny, nástrojové alebo kalené ocele, čiastočne aj nehrdzavejúce

ocele) treba obrábať pri rýchlostiach aj pod  $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Zhruba uprostred ( $150\text{--}200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ) sa nachádzajú ocele s liatinami.



Obr. 1.7 Závislosť štartovacej reznej rýchlosti na posuve spolu so šírkou záberu hlavného ostria ( $f/a_p$ ), pre všeobecné sústruženie a jednotlivé skupiny obrábaných materiálov [10].

Fakty, uvedené na predchádzajúcej stránke potvrdzuje aj literatúra [11], ktorá mimo iného uvádza, že druhý najväčší vplyv na trvanlivosť nástroja má rýchlosť posuvu a až po ňom nasleduje hĺbka záberu hlavného ostia. Príliš vysoká rezná rýchlosť môže spôsobovať: rýchle opotrebenie chrbtu nástroja (VB), rýchle opotrebenie v tvare žliabku (KT), zľú výslednú kvalitu obrobenej plochy alebo plastickú deformáciu nástroja. Naopak, nízka rezná rýchlosť môže spôsobiť: vytváranie tzv. nárazku na reznej hrane nástroja, otupenie reznej hrany, neekonomickosť alebo zľú textúru povrchu.

### 1.3.2 Kvalita obrobenej plochy

Obrobená plocha je výstupom z procesu obrábania. Výsledné vlastnosti majú priamy vplyv na funkčnosť (resp. životnosť) vyrábaného dielu. Súhrn všetkých vlastností obrobenej plochy možno v literárnych prameňoch nájsť pod pojmom integrita povrchu.

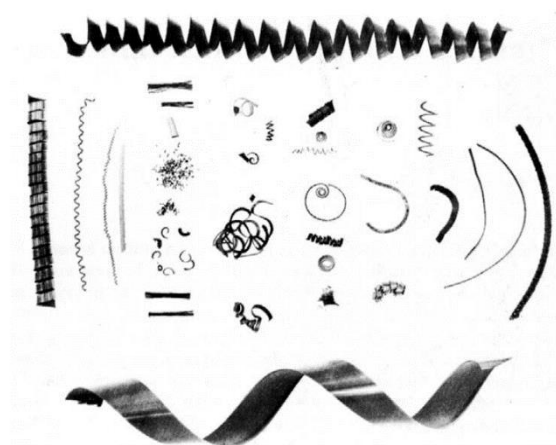
Integrita povrchu sa dá definovať ako súhrn vlastností: presnosť tvarov a rozmerov povrchu, textúra povrchu – najčastejšie parameter  $R_a$  a  $R_z$ , mikroštruktúra alebo zostatková napätosť povrchovej vrstvy. Presnosť tvarov a rozmerov je daná predovšetkým vlastnou výrobnou presnosťou stroja alebo tuhosťou sústavy stroj-nástroj-obrobok. Textúra a mikroštruktúra povrchovej vrstvy sú následkom hlavne reznej rýchlosti, tvaru a stavu opotrebenia nástroja, či chemickej príbuznosti materiálov nástroja a obrobku. Príčinou zostatkových napätí sú zase nerovnomerné pochody v povrchovej vrstve (nerovnomerná plastická deformácia, nerovnomerný ohrev a chladnutie – roztiahnutie a zmrštenie, nerovnomerné zmeny v štruktúre, chemické procesy), ktoré môže spôsobovať napríklad náhla zmena rezných podmienok – šírka záberu hlavného ostia. Z hľadiska kvality obrobenej plochy je žiadúce tlakové zostatkové napätie v povrchovej vrstve, pretože má tendenciu potláčať vznik trhlin na povrchu, prípadne brániť ich šíreniu. [12]

Obrábaný materiál a jeho obrobitelnosť sa teda takisto významne premietajú aj do kvality obrobenej plochy. Ako konkrétny príklad možno uviesť situáciu, ak dôjde ku zmene materiálu obrobku pre konkrétny rezný nástroj. Reznými nástrojmi (napr. VRD) zväčša možno obrábať rôzne skupiny materiálov obrobkov. Zmena môže spôsobiť, že opotrebenie reznej hrany bude rásť s časom ďaleko rýchlejšie a začne sa to prejavovať na obrobenej ploche – zmätkovitosť výroby. Vtedy je potrebné zabezpečiť vhodné monitorovacie prostriedky, ktoré budú predikovať včasnú výmenu nástroja. Riešením je aj zvoliť iný typ nástroja.

Ďalším príkladom je tzv. nárustok. Ide o vrstvu (resp. vrstvy) obrábaného materiálu s úplne inými mechanickými vlastnosťami (tvrdosť a štruktúra) ako pôvodný materiál, ktorá sa zachytáva v okolí ostria rezného nástroja a to za týchto podmienok: vysoká teplota, vysoký tlak, styk chemicky príbuzných materiálov a styk kovovo čistých povrchov. Výskyt nárustku je možno badať u materiálov, ktoré majú priaznivé vlastnosti z hľadiska deformačného spevnenia, väčšinou pri rezaní za nízkych rezných rýchlostí ( $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Nárustok mení geometriu nástroja a teda mení aj parameter rezných podmienok ( $a_p$ ), čo má vplyv na výrobu z hľadiska presnosti. Nárustok sa vyznačuje aj periodickým porušovaním s následným opakovaným zachytením ďalšej jeho vrstvy. Utrhnuté vrstvy sa môžu ďalej zachytiť o obrábanú plochu, čo zhoršuje jej kvalitu (viď obr. 1.5). [7]

### 1.3.3 Trieska

V odvetví obrábania kovov môže vznikajúca trieska (ako odpadový materiál) nadobúdať enormne rozličných tvarov a rozmerov. Obrázok 1.8 znázorňuje prípady, s ktorými sa možno stretnúť. Pre všetky tvary a rozmery triesok však platí, že oddeľovanie začína v tzv. strižnej rovine – rovine maximálnych šmykových napätí (oblasť I). Veľkosť oblasti I závisí predovšetkým od deformačných a spevňovacích schopností materiálu obrobku,  $v_c$ ,  $f$ , uhle čela, prípadne chladení [7]. Enormná veľkosť napätia sa sústreďuje v tejto oblasti za veľmi malý časový okamih a tým dôjde k oddeleniu triesky. Napr. triesky zo šedej liatiny vykazujú najlepšiu fragmentáciu. Materiály s lepšou tvárnosťou v oblasti strižnej roviny zväčša nepodliehajú pri tvorbe triesky porušeniu a tak vznikajú dlhšie triesky rozličných tvarov (napr. vinuté). Tieto triesky sa síce lepšie odstraňujú z priestorov stroja, nie sú však príliš vhodné. Môžu spôsobiť komplikácie behom obrábacieho procesu pri ich nevhodnom hromadení. Naopak, žiadané sú triesky s vysokou fragmentáciou pre ich dobrú skladovateľnosť a následnú efektívnu prepravu. [13]



Obr. 1.8 Typy triesok [13].



### 1.3.4 Silové pôsobenie

V prípade pozdĺžneho sústruženia vonkajšej valcovej plochy je možné reznú silu, pôsobiacu z rezného nástroja na obrobok (resp. z obrobku smerom na nástroj – rezné odpory) v tzv. uvažovanom bode ostria rozložiť do troch zložiek. V prvom rade ide o tangenciálnu zložku reznej sily  $F_c$  (pôsobí v smere vektoru reznej rýchlosti  $v_c$ ) [1]

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}}, \quad (1.7)$$

ktorá sa dá vyjadriť aj pomocou vzťahu zahrňujúceho mernú reznú silu (odpor), prierez triesky a ďalšie vplyvy obr. procesu (chladenie, vplyv prerušovaného rezu a pod.) [1]

$$F_c = A_D \cdot k_c \cdot \prod_1^n K_{Fci}. \quad (1.8)$$

Zložka  $F_f$  v smere posuvu (pôsobí v smere posuvovej rýchlosti  $v_f$ ) [1]

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}}, \quad (1.9)$$

a pasívna zložka reznej sily  $F_p$ , ktorá pôsobí v smere kolmom na smery  $v_c$  a  $v_f$  (radiálny smer) [1]

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}}. \quad (1.10)$$

Výslednú silu možno vypočítať:

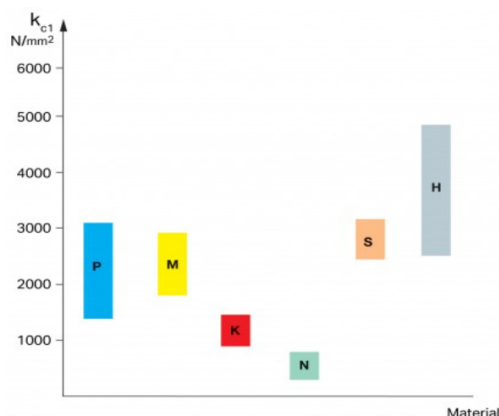
$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}. \quad (1.11)$$

Z vyššie uvedených parametrov je pre prax v obore obrábania kovov najvýznamnejšia sila  $F_c$ , resp.  $k_c$ . Parameter  $k_c$  vyjadruje veľkosť mernej reznej sily, ktorá je nutná na porušenie súdržnosti materiálu, vplyvom pôsobenia obrábacieho procesu. Jednotka mernej reznej sily je MPa čo znamená, že ide o silu vztiahnutú na určitú plochu – v tomto prípade na prierez triesky  $1 \text{ mm}^2$  [1]. Merná rezná sila má teda vysokú výpovednú hodnotu ohľadom obrobiteľnosti daného materiálu obrobku. Vplyv na mernú reznú silu majú veličiny uvedené v kapitole 1.2, z nich predovšetkým: tvrdosť a pevnosť obrábaného materiálu, hrúbka triesky  $h$  (šírka  $b$ , naopak pomerne nevýrazný vplyv), uhol  $K_r$  a  $\gamma_o$ , prípadne rezné prostredie [1].

Mernú reznú silu možno vypočítať pomocou vzťahu [14]:

$$k_c = k_{c1} \cdot h^{-mc} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_o}{100}\right) = k_{c1} \cdot \frac{1}{(f \cdot \sin(K_r))^{mc}} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_o}{100}\right), \quad (1.12)$$

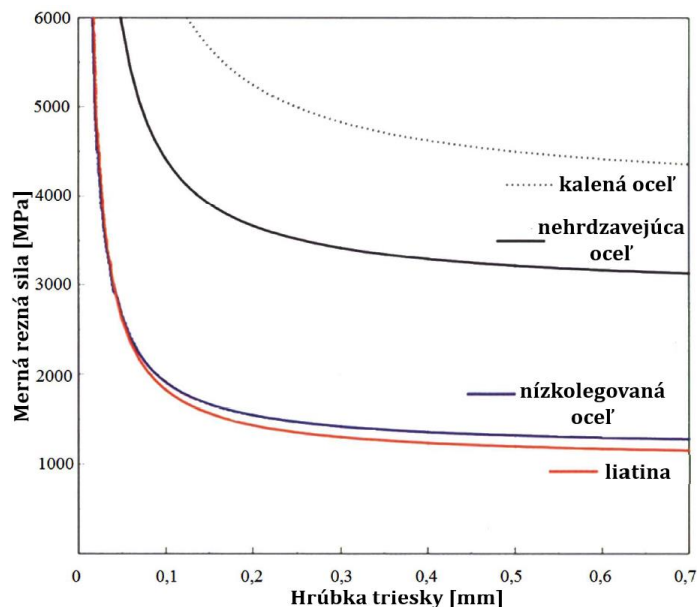
kde  $k_{c1}$  (tzv. primárna hodnota mernej reznej sily) je platná pre prierez triesky  $1 \text{ mm}^2$  ( $h = 1 \text{ mm}$  a  $b = 1 \text{ mm}$ ) a ortogonálny uhol čela  $\gamma_o = 0^\circ$ . Na obr. 1.9 je možné vidieť



Obr. 1.9 Hodnoty primárnej mernej reznej sily pre jednotlivé skupiny materiálov [14].

rozdiely v  $k_{c1}$  pre jednotlivé skupiny materiálov obrobkov. Pre iné hodnoty ortogonálneho uhla čela ako  $\gamma_0 = 0^\circ$  by mala byť použitá korekcia. Ak napríklad uhol čela bude rásť do kladných hodnôt, aktuálna hodnota  $k_c$  sa bude znižovať. V literatúre [1] však možno naraziť na vzťah, v ktorom je táto korekcia vynechaná.

Závislosť mernej reznej sily na hrúbke triesky (obr. 1.10) vyjadruje rozdiely v mernej reznej sile, medzi vytipovanými materiálmi obrobkov. Vzorok z kalenej ocele (skupina H) opäť vykazuje najnepriaznivejšie dôsledky z hľadiska jeho obrobitelnosti – najvyššie hodnoty mernej reznej sily.



Obr. 1.10 Závislosť mernej reznej sily (odporu) na hrúbke triesky [15].

### 1.3.5 Teplota pri obrábaní

Teplota pri obrábaní je ďalší z aspektov, ktorý má vysokú výpovednú hodnotu. Väčšina vzniknutého tepla vzniká v oblasti strihu. Ďalšia časť tepla vzniká vplyvom interakcie trieska-nástroj, interakcie nástroj-obrobok alebo utváraním a lámaním triesky [1]. Dochádza tak k nárastu teploty v oblasti reznej hrany, čo spôsobuje jej rýchlejšiu degradáciu. Môže dôjsť aj ku pozitívnej zmene vlastností materiálu obrobku – „zmäknutie“ vplyvom vysokej teploty, využívané hlavne u vysokorýchlostného HSC obrábania. Konvenčné obrábacie procesy je nutné zoptimalizovať tak, aby podľa možnosti, čo najviac vzniknutého tepla odišlo s trieskou (príp. do rezného prostredia). Teplom ovplyvnená zóna reznej hrany sa označuje HAZ, geometrický bod s najvyššou teplotou PTP a priemerná teplota HAZ sa označ. CT [16]. Najpodstatnejšou vlastnosťou materiálu obrobku z pohľadu vývoja teplota pri obrábaní, je prirodzene jeho tepelná vodivosť. Nízka tepelná vodivosť sťažuje odvod tepla do triesky, ktoré tak zostáva v mieste rezu a prenáša sa smerom do nástroja. Spôsobuje to väčšiu HAZ a CT [16]. Zlepšiť odvod tepla sa dá do určitej miery cez zvýšenie posuvu – nárast hrúbky triesky. Vyvolá to síce väčšiu HAZ, ale zníži sa teplota PTP. Vo všeobecnosti to znamená dlhšiu životnosť nástroja a to hlavne u nehrdzavejúcich ocelí a vysoko legovaných zliatinách [16]. Tvrdosť obrobku je taktiež smerodajná. Účinným riešením sa zdá byť zníženie reznej rýchlosti. Potvrdzuje to aj závislosť z obr. 1.7. Vysokopevné a tvrdé nástrojové ocele (40–50 HRC), prípadne kalené a zušľachtené ocele (50–55 HRC) v nej nadobúdajú tie najnižšie hodnoty  $v_c$ , rádovo na úrovni do 40 m.min<sup>-1</sup>.

## 2 ŤAŽKOOBROBITELNÉ MATERIÁLY

Obor obrábania kovov sa zaoberá celou škálou obrábaných materiálov, vrátane nekovových materiálov. Každý z nich je charakteristický svojimi špecifickými vlastnosťami, ktoré je potrebné poznať a brať do úvahy pri navrhovaní technológie obrábania a jej parametrov, samozrejme aj s ohľadom na konštrukciu vyrábaného dielu.

Pre zjednodušenie a sprehládnenie voľby parametrov obrábacích procesov boli obrábané materiály v súlade so štandardmi ISO rozdelené do šiestich základných skupín. V každej z týchto skupín sú si konkrétne materiály a ich vlastnosti podobné, predovšetkým z hľadiska obrobitelnosti (viď nižšie tabuľka 2.1). [17]

### 2.1 Rozdelenie materiálov obrobkov

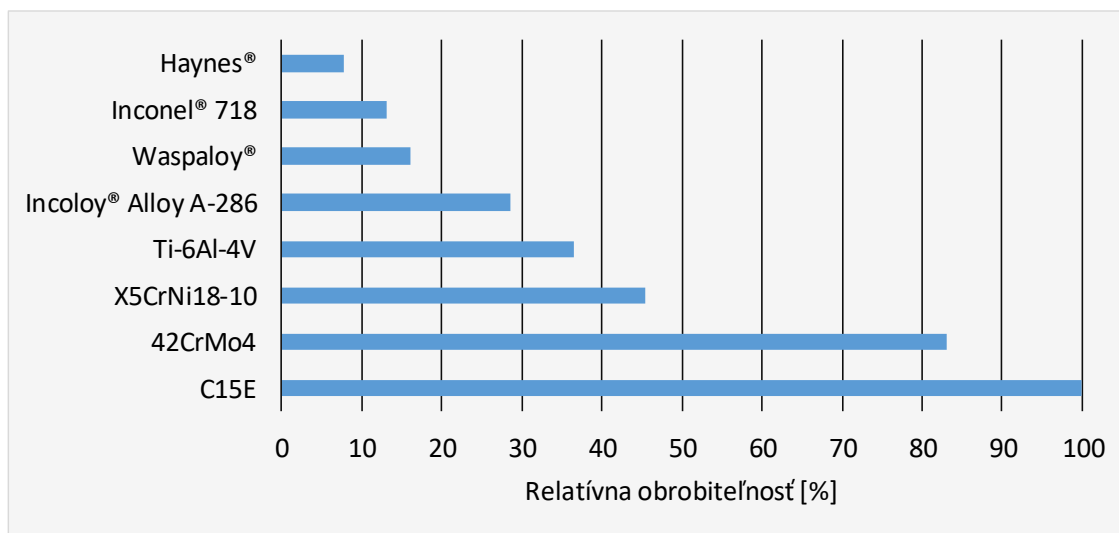
Tab. 2.1 Skupiny obrábaných materiálov [10; 17].

Skupina	Popis	Príklad
<b>ISO P</b>	Najväčšia a najviac používaná skupina. Nelegované až vysokolegované ocele, ocele na odliatky. Obrobitelnosť štandardná.	C45 E295
<b>ISO M</b>	Nehrdzavejúce ocele s min. 12 % Cr. Austenitické, feritické, martenzitické, príp. duplexné ocele. Rezná hrana značne tepelne namáhaná. Opatrebenie nástroja v tvare vrubu a tendencia k tvorbe nárazku.	X45CrSi9-3 X12Cr13
<b>ISO K</b>	Šedá a temperovaná liatina – veľmi priaznivé vlastnosti z hľadiska obrobitelnosti. Izotermicky kalená, vermikulárna a nodulárna sú obrobitelné značne horšie. SiC pôsobí abrazívne na reznú hranu.	EN-GJL-250 EN-GJS-700-2
<b>ISO N</b>	Neželezné kovy – zliatiny Cu a Al (mosadze, bronzy, silumíny a pod.). Hliníkové zliatiny s obsahom Si viac ako 13 % pôsobia na reznú hranu veľmi abrazívne. Vo všeobecnosti nemajú problémy s obrobitelnosťou	EN AW-6082 EN AC-44000
<b>ISO S</b>	HRSA a iné vysokolegované zliatiny na báze kobaltu, niklu a titánu. Nazývané tiež superzliatiny. Obrobitelnosť ešte horšia ako u ISO M. Dochádza ku „nalepovaniu“ materiálu na reznú hranu – problémy s nárazkom. Ďalším problémom je enormné množstvo vzniknutého tepla a mech. spevňovanie materiálu.	Inconel® 718 Haynes® 25
<b>ISO H</b>	Nástrojové a tepelne spracované ocele s tvrdosťou 45–65 HRC. Tvrdené liatiny s tvrdosťou 400-600 HB. Tvrdosť je príčinou ich veľmi zlej obrobitelnosti.	X210Cr12 X38CrMoV5-1
<b>Neobsiahnuté v ISO</b>	Termoplasty, termosety a polyméry. Plasty vystužené sklenými, uhlíkovými alebo aramidovými vláknami. Kompozity z uhlíkových vlákien, tvrdené gumeny, príp. technický grafit.	–

Materiálová stránka tejto práce je zameraná na problematiku superzliatin na báze kobaltu, konkrétne ide o zliatinu UmCo50. Tento materiál možno zaradiť do skupiny ťažkoobrobitelných materiálov, kde okrem spomínaných superzliatin možno

vo všeobecnosti zaradiť taktiež nehrdzavejúce ocele (ISO M), príp. tvrdokovy (ISO H). Problémy pri obrábaní týchto materiálov sú si veľmi podobné a sú popísané nižšie.

Obr. 2.1 znázorňuje vhodnosť k obrábaniu vybraných materiálov. Najlepšie výsledky z hľadiska obrábiteľnosti vykazuje nízkouhlíková oceľ C15E. Možno si takisto všimnúť, že predstavitelia skupiny ISO S (Inconel® 718, Waspaloy® alebo materiály skupiny Haynes®) dosahujú najhorších hodnôt (8–36 %).



Obr. 2.1 Orientačné porovnanie relatívnej obrábiteľnosti vybraných materiálov [9].

## 2.2 Nehrdzavejúce ocele

Nehrdzavejúce ocele sa vyznačujú obsahom chrómu v rozmedzí 12–25 %, čo má za následok ich koróznú odolnosť. Vysoké obsahy niklu (pre austenitické a vysokopevnostné ocele až do 25 %) vytvárajú austenitickú štruktúru, ktorá spôsobuje mimoriadne vysoké hodnoty mechanického spevňovania. Dusík prispieva ku zvýšenej koróznej odolnosti a pevnosti, naopak z dôvodu zvýšenej veľkosti deformačného spevnenia zhoršuje obrábiteľnosť. Opačným spôsobom sa prejavuje prísada síry. [17; 9]

Vo všeobecnosti možno nehrdzavejúce ocele klasifikovať do štyroch kategórií, podľa primárnej zložky matrice: feritické, martenzitické, austenitické a duplexné (feriticko-austenitické). Ďalej ich je možné rozdeliť na precipitačne vytvrditeľné a precipitačne nevytvrditeľné. Nehrdzavejúce ocele sa považujú za ťažkoobrobiteľné materiály pre ich vysokú pevnosť, tvárnosť, deformačné spevňovanie, zlú tepelnú vodivosť a abrazívny charakter. Táto kombinácia vlastností sa samozrejme musí prejavovať na zvýšených hodnotách zložiek rezných síl, teplotách, opotrebení nástroja, vrátane problémov s delením triesky, nárastkom a výslednou kvalitou obrobenej plochy (kapitola 1.3). Feritické ocele majú vcelku priaznivé vlastnosti z hľadiska obrábiteľnosti, avšak s rastúcim obsahom chrómu sa tieto vlastnosti zhoršujú. Pre martenzitické ocele je smerodajný hlavne obsah uhlíku (ovplyvňuje tvrdosť), obsah niklu a metalurgická štruktúra (obsah voľného feritu). Zvyšujúci sa obsah uhlíku a niklu nepriaznivo ovplyvňuje obrábiteľnosť. Austenitické ocele predstavujú najväčšiu skupinu z kategórie nehrdzavejúcich ocelí. Za posledných niekoľko rokov tvoria približne 65 – 70 % z uvedeného celku. Obrábajú sa horšie ako feritické a martenzitické nehrdzavejúce ocele (relatívna obrábiteľnosť rádovo 60 %). Duplexné ocele majú síce podobné chemické zloženie ako austenitické, obrábajú sa však ešte horšie (relatívna obrábiteľnosť rádovo 30 %). Je to spôsobené ich precipitačným vytvrdením. Medzi základné triedy spekaných karbidov odporúčaných pre obrábanie austenitických ocelí

možno zaradiť: TiCN-TiN (4  $\mu\text{m}$ ) PVD povlakovaný jemnozrnný karbid M15 – dokončovacie operácie, TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN (5,5  $\mu\text{m}$ ) CVD povlakovaný karbid taktiež pre dokončovanie a polodokončovanie alebo napr. TiAlN-TiN (4  $\mu\text{m}$ ) PVD povlakovaný substrát M25 karbidu pre polohrubovacie a hrubovacie operácie. Posledný variant je možné použiť aj pre duplexné ocele. Všeobecné odporúčania, na ktoré by sa malo dbať pri obrábaní pri obrábaní týchto materiálov by sa dali zhrnúť nasledovne: korekcia reznej rýchlosti (viď kapitola 1.3.1), zvýšená pozornosť na tuhosť sústavy stroj-nástroj-obrobok-upínanie, udržiavať hodnoty  $f$  nad minimálnymi úrovňami pre elimináciu zlej integrity povrchu, udržiavať hodnoty  $a_p$  mimo deformačne spevnenej vrstvy pre vyhnutie sa nadmernej primárnej ryhe na chrbte, promptnejšia výmena nástroja pri otupení – tupé nástroje súvisia s tvorbou nárastku a s efektom deformačného spevnenia, pri problémoch s odvodom tepla je vhodné použiť procesné kvapaliny. [9; 17]

Za vhodného predstaviteľa nehrdzavejúcich ocelí je možno považovať austenitickú oceľ X5CrNi18-10. Základné vlastnosti (mechanické, fyzikálne a chemické zloženie), ktoré majú súvis s jej obrobitelnosťou sú uvedené v tabuľke 2.2.

Tab. 2.2 Mechanické a základné fyzikálne vlastnosti ocele X5CrNi18-10 (žíhaná na mätko) [18].


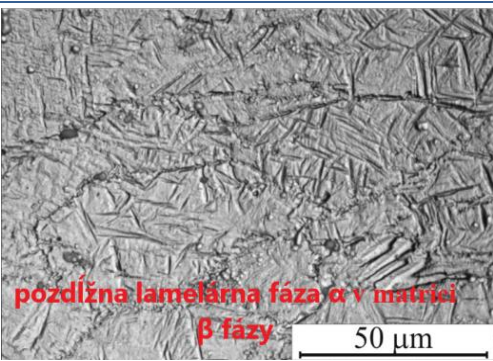
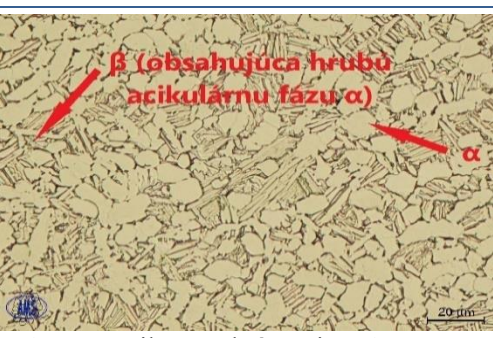
X5CrNi18-10	
Chemické zloženie [%]	18,5 Cr, 9 Ni, max. 2 Mn, max. 1 Si, max. 0,10 N, max. 0,07 C, max. 0,045 P, max. 0,03 S
$R_{p0,2}$ [MPa]	min. 190
$R_m$ [MPa]	500–700
HB	max. 215
$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	7900
$\lambda$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	15
$A_5$ [%]	35–45



## 2.3 Titánové zliatiny

Titán vyniká a je využívaný pre svoj výborný pomer pevnosti a hmotnosti, vysokej teploty tavenia (1668 °C) a koróznej odolnosti. Jeho hustota činí približne 57 % z hustoty železa, avšak pevnosť je na úrovni legovaných ocelí. Svoju pevnosť si zachováva aj pri teplotách 450–600 °C. Zliatiny na báze titánu je možné použiť aj v záporných teplotách. Nevýhodou je jeho náročná a nákladná výroba (obrábanie, odlievanie alebo zvarovanie). Titán má taktiež zlé trecie vlastnosti. Rozdelenie zliatin titánu, spoločne s ďalšími detailmi je znázornené v tabuľke 2.2, vrátane ukážok mikroštruktúry (obrázok 2.2–2.4). [19]

Tab. 2.3 Druhy zliatin titánu.

Druh zliatiny	Stabilizujúce prvky [19]	Príklad	Ukážka mikroštruktúry
<b>Zliatiny <math>\alpha</math></b>	Al (najväčší vplyv na stabilizáciu tuhého roztoku $\alpha$ ) a nečistoty (O, N, C) zvyšujú tvrdosť a krehkosť	<b>Ti99,5</b> (99,5 % Komerčne čistý titán)	 <p>rovnoosé zrná <math>\alpha</math> nečistoty na báze H, N, C</p> <p>Obr. 2.2 Mikroštruktúra Ti99,5 [20].</p>
<b>Zliatiny <math>\beta</math></b>	Tuhý roztok $\beta$ je zachovaný až do teploty okolia ako stabilná fáza (Nb, Mo, Ta, V) alebo sa pri nízkej teplote rozpadá eutektoidnou premenou (Cu, Si, Fe, Mn, Cr)	<b>Ti-10V-2Fe-3Al</b> (Zliatina blízko $\beta$ )	 <p>pozdĺžna lamelárna fáza <math>\alpha</math> v matrici <math>\beta</math> fázy</p> <p>Obr. 2.3 Mikroštruktúra Ti-10V-2Fe-3Al [21].</p>
<b>Zliatiny <math>\alpha + \beta</math></b>	Zmes prvkov z $\alpha$ a $\beta$	<b>Ti-6Al-4V</b>	 <p><math>\beta</math> (obsahujúca hrubú acikulárnu fázu <math>\alpha</math>) <math>\alpha</math></p> <p>Obr. 2.4 Mikroštruktúra Ti-6Al-4V [20].</p>

Mechanické a funkčné vlastnosti sú rozhodujúce pre aplikáciu týchto zliatin, ako konštrukčného materiálu v oblasti nadzvukového letectva alebo kozmického priemyslu. Ostatné aplikácie možno hľadať v medicíne (biokompatibilita), oblasti športového vybavenia, automobilovom, chemickom, prípadne energetickom priemysle. Komerčne čistý titán a  $\alpha$  zliatiny sú používané prevažne v kryogenických aplikáciách. Zliatiny  $\alpha$ - $\beta$  sú zase hojne využívané v leteckom a kozmickom priemysle (kostry

lietadiel alebo komponenty motorov). Skupina z radu  $\beta$  nachádza uplatnenie vo vysokopevnostných aplikáciách pre ich priaznivé vlastnosti z hľadiska tvárnosti. Taktiež pre ich zlú tepelnú vodivosť sa zároveň obrábajú najhoršie spomedzi zliatin titánu (oproti C45 majú relatívnu obrobitelnosť na úrovni 30–50 %). Zliatiny  $\alpha$  sa pohybujú na úrovni relatívnej obrobitelnosti približne 45–60 %. [9]

Vysoký obsah titánu má za následok aj vynikajúcu koróznú odolnosť, ktorá často prevyšuje aj ostatné konkurenčné materiály. Je to spôsobené vysokou reaktivnosťou titánu s kyslíkom, kde je výsledkom vrstva  $\text{TiO}_2$ . Hrúbka tejto vrstvy sa pohybuje zvyčajne okolo jednej stotiny milimetra. V prípade jej porušenia vonkajším vplyvom dochádza k okamžitému obnoveniu. [17]

Prehľad vlastností titánových zliatin pri obrábaní a z toho plynúce dôsledky sú zhrnuté v tabuľke 2.4.

Tab. 2.4 Vlastnosti pri obrábaní titánových zliatin a ich vplyv na nástrojový materiál [22].

Jav	Dôsledok na rezný nástroj
Vysoká pevnosť (aj pri zvýšených teplotách)	Značné zvýšenie rezných síl, zväčšenie HAZ, nárast PTP a CT
Tenké triesky, ktoré prichádzajú do úzkeho kontaktu s čelom nástroja	Koncentrovanie rezných síl v oblasti špičky, abrazívne opotrebenie čela
Nízka tepelná vodivosť	Zväčšenie HAZ, nárast PTP a CT – nutná vysoká teplotná stabilita nástroja
Cyklické formovanie triesky – kolísanie síl	Sklony k vibráciám/kmitaniu
Chemická reaktivita s nástrojovým materiálom	Tvorba žliabku na čele
Prítomnosť karbidov	Opotrebovanie chrbtovej časti nástroja

Prevažnú väčšinu aplikácií zliatin titánu reprezentuje zliatina Ti-6Al-4V, čo potvrdzujú aj katalógy rôznych výrobcov rezných nástrojov, v ktorých jej je venovaná mimoriadna pozornosť (napr. v literatúre [22]). Základné vlastnosti (mechanické, fyzikálne a chemické zloženie), ktoré majú súvis s jej obrobitelnosťou sú uvedené v tabuľke 2.5.

Tab. 2.5 Mechanické a základné fyzikálne vlastnosti zliatiny Ti-6Al-4V (žíhané na 732 °C cca 4 h, ochladenie do 566 °C v peci potom vzduch) [23].

Ti-6Al-4V	
Chemické zloženie [%]	89,5 Ti, 6 Al, 4 V, 0,25 Fe, max. 0,08 C, max. 0,03 N, max. 0,0125 H
$R_{p0,2}$ [MPa]	790
$R_m$ [MPa]	860
HB	326
$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	4430
$\lambda$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	6,7
$A_5$ [%]	15

## 2.4 Niklové zliatiny

Nikel je možné charakterizovať ako feromagnetický a ušľachtilý kov, s čím súvisí aj jeho vysoká cenová relácia. Dokazuje to jeho prítomnosť vo viacerých modifikáciách konštrukčných materiálov (oceľ, niklové polotovary, zliatiny na báze niklu), ktoré nevynikajú len z hľadiska mechanických vlastností ale aj z pohľadu elektrotechnických vlastností, korózne odolnosti alebo teplotného namáhania. Medzi jeho bežné aplikácie možno zaradiť: ventilové sedlá spaľovacích motorov, diely parných armatúr, regulačné odpory, odporové teplomery alebo diely alkalických akumulátorov [19]. Komerčne vyvinuté niklové skupiny superzliatin (Pyromet<sup>®</sup>, René<sup>®</sup> alebo napr. Inconel<sup>®</sup>) tvoria podľa literatúry [9] až 50 hm. % materiálov, ktoré sú používané pre konštrukciu prúdových motorov v letectve (oblasť plynových turbín). Ďalšími známymi skupinami superzliatin sú: Hastelloy<sup>®</sup>, Incoloy<sup>®</sup>, Nimonic<sup>®</sup> alebo Waspaloy<sup>®</sup>.

Literatúra [19] rozdeľuje niklové zliatiny na: konštrukčné zliatiny niklu (tabuľka 2.6), zliatiny niklu so špecifickými fyzikálnymi vlastnosťami (tabuľka 2.7) a na žiaruvzdorné a žiarupevné zliatiny niklu.

Tab. 2.6 Konštrukčné zliatiny niklu [19].

Druh	Popis
Zliatiny Ni-Be	Obsah Be do 2 %. Po precipitačnom vytvrdení dosahujú pevnosť až 1800 MPa. Výborná húževnatosť. Použitie do 500 °C. Pružiny, membrány, trysky.
Zliatiny Ni-Cu	Zvyknú sa nazývať monely. Sú komplexne legované (s prísadami Fe, Mn, Si) a podľa spracovania majú pevnosť 500–1200 MPa, vytvrditeľné (pridaním Al) až 1400 MPa. Zlievarenské monely – vyšší obsah Si o 3 – 4 %, na rozdiel od tvárnených. Výborná korózna odolnosť. Použitie v potravinárskom, chemickom, alebo farmaceutickom priemysle (diely čerpadiel alebo lopatky turbín).
Zliatiny Ni-Mo	Vhodné pre odlievane diely vystavené agresívnemu prostrediu (kyselina soľná alebo chloridy)
Zliatiny Ni-Mn	Prítomné môžu byť aj prísady Si, Cr. Výborná kombinácia korózne odolnosti a odolnosti voči teplotnému namáhaniu. Taktiež odolnosť voči sýrny zlučeninám. Použitie napr. ako elektródy zapaľovacích sviečok.

Tab. 2.7 Niklové zliatiny so špecifickými fyzikálnymi vlastnosťami [19].

Druh	Popis
Termočlánkové zliatiny Ni-Cr	Niklové zliatiny chromel s obsahom Cr 9–12 % a aludel (1,5 % Si, 2 % Mn a 2,2 % Al) môžu spolu tvoriť termočlánok pre teploty 300–1000 °C.
Odporové zliatiny na báze Ni-Cr	Nichromy, pyrochromy alebo chromnikle s obsahom Cr cca 20 %. Zvyčajne použiteľné do 1150 °C. Drahý Ni sa dá čiastočne nahradiť pridaním Fe (do 25 %) a zlepšiť odolnosť proti S, použitie sa ale zníži na 1000 °C.
Magnetické mäkké zliatiny	Označované ako permaloy. Okrem Ni obsahujú Fe (22–64 %) a môžu obsahovať aj Cr, Cu a Mo. Používajú sa pre jadrá transformátorov do meracích zariadení a prístrojov. Výnimočné magnetické vlastnosti kladú vysoké nároky na čistotu prísad a výrobné technológie, čo vplýva na cenu.
Zliatiny s malou teplotnou	Tzv. invar alebo elinvar, na báze Ni-Fe. Možno ich skôr zaradiť medzi zliatiny železa so špecifickými vlastnosťami.

Žiaruvzdorné a žiarupevné zliatiny Ni (spoločne so zliatinami kobaltu) spĺňajú požiadavky na úspešné a dlhodobé odolávanie podmienkam, kde v technickej praxi dochádza k tým najvyšším zaťaženiam z hľadiska teploty, alebo teploty súčasne



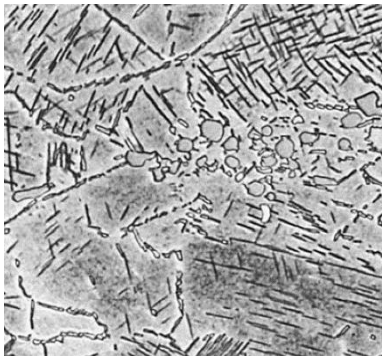

s napětím. Podstatu žiaruvzdorných zliatin na báze Ni tvorí vzájomná interakcia Ni a Cr – tvoria sústavu s úplnou rozpustnosťou v tuhom stave. Chróm tvorí teda základnú prísadu týchto zliatin a v podstate žiaruvzdornosť je podmienená jeho prítomnosťou. Tieto zliatiny obyčajne obsahujú 15–30 % Cr. Môžu však mať aj ternárny charakter, kde sa kvôli úspore Cr nahrádza Fe (až 20 %). Štruktúra žiaruvzdorných Ni zliatin sa dá charakterizovať tuhým roztokom s mriežkou FCC, spevnený substitučne. To je dôvod prečo tieto materiály nemôžu prenášať významnejšie mechanické namáhanie. [19]

Podstatu žiarupevných zliatin Ni tvorí takisto tuhý roztok na báze Ni-Cr. Významnými prvkami sú tu však navyše Al a Ti, ktoré sú základom pre vytvrdzujúcu fázu. Vysoko disperzné precipitáty intermetalických zlúčenín vznikajú starnutím metastabilného tuhého roztoku (ochladený tuhý roztok z rozpúšťacieho žihania). Hliník vytvára zlúčeninu  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , titán zase  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ . Prítomnosť oboch prvkov súčasne smeruje ku vzniku  $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$  – fáza  $\gamma'$  (tuhý roztok Ti v zlúčenine  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ). Prípadne môžu byť prítomné karbidotvorné prvky. Pri použití vhodného tepelného spracovania je možné na základe ich prítomnosti v štruktúre možné dosiahnuť vznik disperzie karbidov, substitučne spevňujúcich niklovú maticu. Ide o karbidy  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{M}_7\text{C}_3$  alebo  $\text{M}_6\text{C}$ , ktoré sa tvoria pozdĺž hraníc zŕn, kde slúžia ako prekážka proti klzu. Kovovú zložku karbidov tvorí Cr, príp. Mo. Žiarupevnosť u zliatin na báze Ni podmieňuje prítomnosť fázy  $\gamma'$  a to rovnomerným rozdelením v celom objeme. S rastúcim objemovým podielom  $\gamma'$  sa zlepšuje žiarupevnosť, klesá ale tvárnosť. Bohato legované zliatiny Ti a Al by sa dali už charakterizovať skôr rozhraním keramika-kov, ktoré sa dajú spracovávať výhradne presným liatím. Drvivá väčšina žiaruvzdorných a žiarupevných zliatin na báze Ni je všeobecne považovaná za náročne spracovateľnú – zložitie odlievania (vo vákuu), tvárnenie a aj obrábanie. [19]

Z pohľadu obrábiteľnosti sú niklové zliatiny na tom veľmi zle a spôsobujú viacero problémov pri procese obrábania. Najväčšie problémy spôsobujú zliatiny prechádzajúce procesom starnutia. Ide o podobné problémy ako aj u ostatných ťažkoobrobiteľných materiáloch: zlá tepelná vodivosť alebo sklony k deformačnému spevňovaniu. Ďalším výrazným problémom je nevýrazný pokles pevnosti so zvyšujúcou sa teplotou v mieste rezu (na rozdiel od bežne obrábaných materiálov), čoho výsledkom sú vysoké rezné sily a to aj pri tzv. vysokorýchlostnom obrábaní. Práve to je dôvod generovania značného množstva tepla pri obrábaní týchto materiálov, kedy nie je nič nezvyčajné vidieť z miesta rezu odchádzať do oranžova rozpalenú triesku. Prítomnosť tvrdých, abrazívne pôsobiacich fáz (karbid titánu, karbid nióbu, príp. fáza  $\gamma'$ ) na reznú hranu nástroja taktiež ničomu neprospieva. Pre zníženie hodnôt opotrebenia nástroja je tu nutné pristúpiť v prvom rade ku zníženiu reznej rýchlosti (viď aj kapitola 1.3.1). Deformačné spevňovanie povrchovej vrstvy na obrobenej ploche robí voľbu posuvu taktiež veľmi dôležitou. Hodnoty v rozsahu 0,18–0,25 mm sa zdajú byť kompromisom medzi minimalizáciou deformačného spevnenia (vznik pri pomalých posuvoch) a predčasnými zničeniami nástrojov, ktoré vznikajú u príliš vysokých hodnotách posuvu. Kvôli minimalizácii efektu trenia sa taktiež odporúča používať pozitívnu geometriu čela. Ďalšie odporúčania pre obrábanie niklových zliatin možno nájsť v literatúre [24], s rozvrhnutím do piatich skupín podľa spoločných znakov pri obrábaní. [24]

Najpopulárnejšou niklovou zlatinou v katalógoch výrobcov rezných nástrojov sa zdá byť zliatina Inconel® 718, preto stojí za zmienku uviesť pár detailov k tejto zlatine (tabuľka 2.8).

Tab. 2.8 Mech. vlastnosti, základné fyzikálne vlastnosti a mikroštruktúra zliatiny Inconel® 718 (žíhané 1065 °C, starnutie 760 °C/10 h a chladnutie v peci na 650 °C a výdrž ďalších 10 h) [25].

<b>Inconel® 718</b>	
<b>Chemické zloženie [%]</b>	50 – 55 Ni+Co, 19 Cr, 5 Nb+Ta, 3 Mo, 0,9 Ti, 0,5 Al, max. 1 Co, max. 0,08 C, max. 0,35 Mn, max. 0,35 Si, max. 0,015 P, max. 0,015 S, max. 0,006 B, max. 0,03 Cu, Fe zvyšok
<b>R<sub>p0,2</sub> [MPa]</b>	1050
<b>R<sub>m</sub> [MPa]</b>	1310
<b>HRC</b>	43
<b>ρ [kg.m<sup>-3</sup>]</b>	8190
<b>λ [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]</b>	11,4
<b>A<sub>5</sub> [%]</b>	24
<b>Mikroštruktúra</b>	
	

Obr. 2.5 Mikroštruktúra Inconel® 718 pôvodné zväčšenie 1000x (Lavesova fáza – svetlo-šedé častice, MC karbidy – tmavé, ihlicovitá δ fáza – Ni<sub>3</sub>Nb, pozn. matrica je tvorená fázou γ) [25].

Obr. 2.6 Mikroštruktúra Inconel® 718 z obrázka 2.4, zväčšená ešte o 10x (MC karbidy, ihlicovitá δ fáza, vytvrdzujúca fáza γ' v matrici γ) [25].

## 2.5 Kobaltové zliatiny

Kobalt možno klasifikovať strategický a veľmi významný kov, najmä kvôli jeho veľkému využitiu v obrannom priemysle. Využíva sa pre výrobu: zliatin HRSA, zliatin s odolnosťou voči korózii a opotrebeniu, magnetov, HSS ocele alebo spekaných karbidov. Niektoré kobaltové zliatiny sú taktiež biokompatibilné, čo umožňuje ich použitie ako implantáty v oblasti medicíny. [25]

Ide o veľmi špecifické materiály z hľadiska použitia v technickej praxi – kobaltové zliatiny (so značným obsahom chrómu). Práve zmes chrómu a kobaltu tvorí základnú ideu týchto zliatin, z ktorej pramení vynikajúca odolnosť voči opotrebeniu a korózii. Molybdén a volfrám zase vo všeobecnosti prispievajú k pevnostným charakteristikám v systéme kobalt-chróm. Je tu prítomných však aj množstvo ďalších legujúcich prvkov. Priekopníkom týchto zliatin sa stal ešte v minulom storočí Elwood Haynes. Na jeho počesť boli pomenované viaceré kobaltové zliatiny používané dodnes. [26]

Čistý kobalt sa môže vyskytovať v dvoch modifikáciách. Pri teplotách do 417 °C ide o hexagonálnu (HCP) stabilizátory sú Cr, Mo alebo W), nad touto teplotou je to modifikácia s mriežkou FCC (stabilizátormi sú Ni, Fe alebo C). Teplota transformácie sa vždy mení v závislosti od prítomnosti a obsahu jednotlivých legujúcich prvkov. [26]

Literárne pramene rozdeľujú kobaltové zliatiny zvyčajne na tieto tri základné skupiny:

- zliatiny navrhnuté primárne kvôli odolnosti voči opotrebeniu,
- zliatiny navrhnuté pre vysokoteplotné použitie,
- zliatiny navrhnuté pre odolnosť voči korózii od roztokov a opotrebeniu.

V súvislosti s kobaltovými zliatinami sa často v literatúre možno stretnúť s pojmom vysoko entropické zliatiny (HEA). Možnou definíciou tohto pojmu môže byť fakt, že ide o zliatiny, ktoré obsahujú vo svojom zložení 4 a viac hlavných kovových prvkov, zvyčajne v rozmedzí 5–35 %. Tieto prvky sú veľmi čisté (viac ako 99 %), v takmer atomárnej kompozícii. HEA sa väčšinou vyskytujú v modifikácii FCC, príp. aj BCC. Kľúčovými prvkami sú kobalt, nikel a železo. Štruktúra s FCC je vhodnejšia z hľadiska húževnatosti, je však mäkkšia a má horšie tribologické vlastnosti. Prednosťami HEA sú vo všeobecnosti tieto vlastnosti: korózna odolnosť, odolnosť voči rôznym druhom opotrebenia, pevnosť (aj za vysokých teplôt), tvrdosť a termodynamická stabilita. Výskum, vďaka ktorému boli zistené rôzne špecifické zloženia a obsahy týchto zliatin, a taktiež aj ich vysoká statická entropia, priniesol svoje výsledky v podobe vysoko stabilnej štruktúry, s čím súvisí aj ich značne potlačená difúznosť. Rôznymi chemickými zloženiami, príp. tepelným spracovaním možno získať rôzne variácie vlastností konkrétnej HEA, ktoré určujú jej zaradenie. [27]

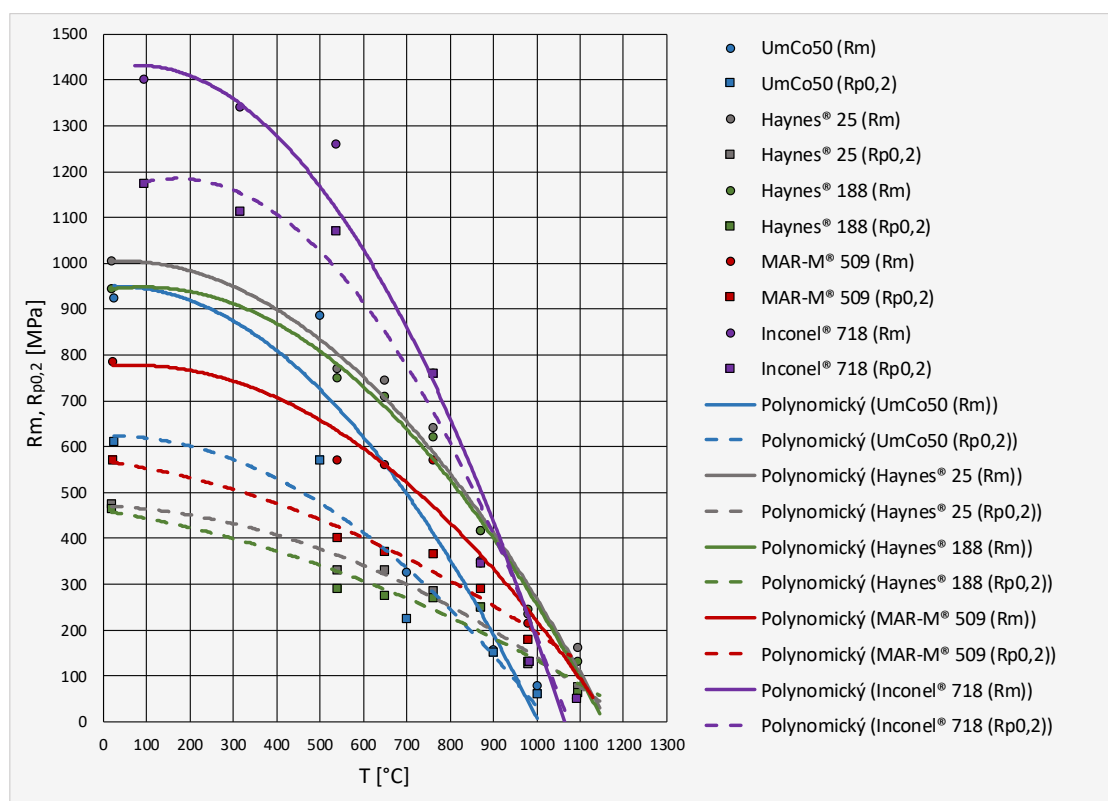
### 2.5.1 Kobaltové zliatiny s odolnosťou voči opotrebeniu

Príčinou ich značnej odolnosti voči opotrebeniu sú sklony k nadobúdaniu vysokých hodnôt mechanického spevňovania. To je dôsledkom zlučovania vrstevných chýb (ľahký priečny sklz) a taktiež aj mechanického dvojčatenia pri práci za studena, kedy sa kobaltové zliatiny zvyčajne nachádzajú v metastabilnej FCC forme, aj keď ich teplota je už hlboko pod teplotou transformácie. Čiastočná transformácia je vyvolaná ľahko, pôsobením mechanického napätia za izbovej teploty. Nemenej dôležitou príčinou odolnosti voči opotrebeniu je formovanie karbidov v mikroštruktúre počas tuhnutia, k čomu prispieva prítomnosť uhlíka. Karbidy zabezpečujú odolnosť voči abrázii (za nízkeho ale aj vysokého zaťaženia) a vysokú tvrdosť. Na druhej strane však príliš vysoký obsah karbidov zhoršuje tvárnosť a koróznú odolnosť (ochudobnenie o chróm). Pri procesoch spôsobujúcich mikroúnavu (napr. kavitácia, dopady tuhých častíc alebo kvapiek tekutiny na povrch, či abrazívne opotrebenie) sa zdá byť rozhodujúcim faktorom práve matrica bohatá na kobalt a jej charakteristická, silná atómová súdržnosť. Podľa obsahu chrómu, uhlíku a volfrámu sa môžu v týchto zliatinách vyskytovať rozličné množstvá a typy karbidov. Zliatina Stellite® 6 s obsahom uhlíka 1,1 % vykazuje približne 13 hm. % karbidov typu  $M_7C_3$  (bohaté na chróm), kým napr. Stellite® 3 (obsah uhlíku 2,4 %, rovnako ako Stellite® 1) obsahuje cca 29 hm. %, avšak tieto sú kombináciou typov  $M_7C_3$  a  $M_6C$ . Pri týchto zliatinách stojí za zmienku aj zliatina Tialoy® T-800. Okrem jej výbornej odolnosti voči odieraniu (kov na kov) disponuje aj výbornou odolnosťou voči kyselinám, naopak nevýhodou je krehkosť. Namiesto formovania karbidov, je tu však použitá precipitácia tvrdej intermetallickej zlúčeniny v podobe Lavesovej fázy. Benefity prvej skupiny kobaltových zliatin nespočívajú len v odolnosti voči opotrebeniu, ale aj v značnej korózne odolnosti voči roztokom. Príkladom je tvárnená verzia zliatiny Stellite® 6 – Haynes® 6B, ktorej je v literatúre [26] venovaná vyššia pozornosť, aj s ohľadom na koróznú odolnosť práve voči roztokom. Za odolnosťou voči roztokom stojí zase najmä trojica zložiek: chróm, uhlík a volfrám. Chróm je rozhodujúci pre zahájenie pasivácie a jeho efektívny obsah

z tohto hľadiska je ďaleko nižší ako nominálny obsah. Volfrám plní šľachtiacu funkciu smerom ku kobaltu, pre použitie do aktívneho korózneho prostredia, podobne ako molybdén u nehrdzavejúcich oceliach alebo niklových korózných zliatinách. Ak je obsah uhlíku dostatočný, volfrám pôsobí fixačne na maticu, prostredníctvom formovania karbidov. [26]

### 2.5.2 Kobaltové zliatiny pre vysokoteplotné použitie

Aj keď kobaltové zliatiny nemajú takú širokú oblasť použitia vo vysokoteplotných aplikáciách ako niklové zliatiny, napriek tomu hrajú v tejto oblasti významnú úlohu. Excelentná korózna odolnosť (aj v sírnom prostredí) a zachovaná pevnosť za vysokých teplôt, pri ktorých v prípade niklových zliatin dochádza k rozpusteniu dôležitých precipitátov ( $\gamma'$  a  $\gamma''$ ) radí v týchto aplikáciách kobaltové zliatiny práve pred niklové. Nasvedčujú tomu aj krivky na obrázku 2.7. [25]



Obr. 2.7 Závislosť  $R_m$  a  $R_{p0,2}$  na teplote vybraných zliatin: UmCo50 (stav po tvárnení), Haynes® 25 (plech valcovaný za studena po rozpúšťacom žíhaní), Haynes® 188 (plech valcovaný za studena po rozpúšťacom žíhaní), MAR-M® 509 (pravdepodobne liata), Inconel® 718 (tyč valcovaná za tepla – žíhaná, starnutá) [25].

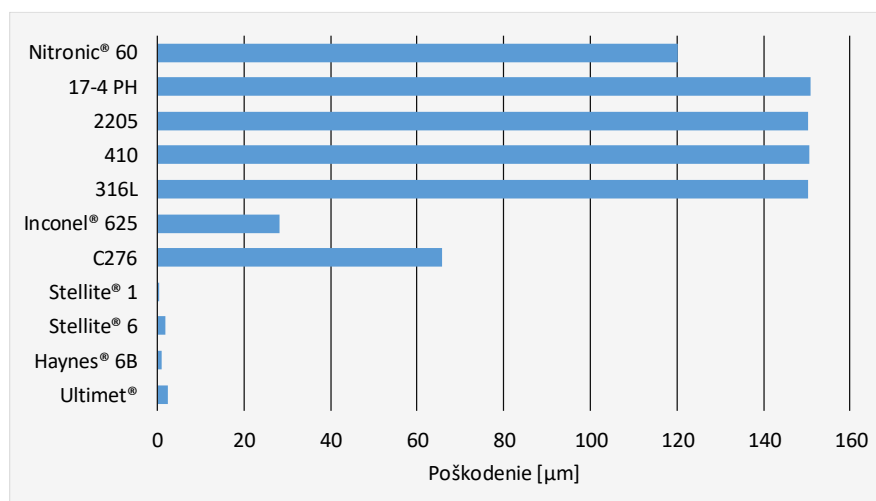
Zliatiny Haynes® 25 (tabuľka 2.9) a Haynes® 188 sú najčastejšie využívanými kobaltovými zliatinami pre vysokoteplotné použitie. Sú k dispozícii vo forme plechov, platní, potrubí alebo tyčí, čo naznačuje ich dobre zvládnuté tvárniace procesy. Sortiment pre zváranie týchto materiálov je taktiež široký. Majú ešte lepšiu odolnosť voči oxidačnej korózii a mikroštruktúrnú stabilitu ako zliatiny s odolnosťou voči opotrebeniu. Majú len približne 0,1 hm. % uhlíka (desatina oproti Haynes® 6B), čo je optimálne množstvo, aby dochádzalo ku spevňovaniu pomocou karbidov, a tiež bolo možné zachovať ich tvárnosť. Precipitácia karbidov je dominantne tvorená vylučovaním typu  $M_6C$ , ktorý je veľmi dôležitý z hľadiska vlastností vo vysokých teplotách, pretože



do istej miery zamedzuje rastu zrna pri tepelnom spracovaní alebo prevádzke. Štruktúrna stabilita týchto zliatin je zlepšovaná znižovaním teploty transformácie FCC/HCP pomocou niklu. Pridávaním komponentov ako lantán, kremík, hliník alebo mangán, sú dosiahnuté excelentné vlastnosti týchto zliatin – odolnosť voči oxidácii aj nad 1100 °C, odolnosť voči horúcej korózii, odolnosť voči creepu, tvárnosť aj za studena, alebo zachovanie ťažnosti aj po starnutí (počas dlhej doby v prevádzke). Možnými aplikáciami Haynes® 25 sú napr. horúce zóny plynových turbín, komponenty jadrových reaktorov, zariadenia pre chirurgické implantáty alebo trecie doštičky. Haynes® 188 je zase skôr vhodnejšia pre plechové diely, ako napr. spaľovacie a prechodové komory plynových turbín. Známymi zliatinami z tejto kategórie sú aj liate MAR-M® 509 alebo FSX-414. Vysoký obsah chrómu v týchto zliatinách (18–30 %) prispieva ku odolnosti voči oxidácii, odolnosti voči sulfatácii, odolnosti voči horúcej korózii, precipitácii karbidov ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$  a  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ ) a spevňovaniu tuhého roztoku. Obsahy uhlíka v liatych variantoch zliatin kobaltu pre vysokoteplotné použitie sa pohybuje v rozsahu 0,1–1 % a príležitostne ho môže zastupovať dusík. Obsahujú taktiež významné množstvá niklu a volfrámu. Nikel pomáha udržiavať žiadanú FCC maticu, volfrám plní funkciu fixácie tuhého roztoku a podporuje tvorbu karbidov. Ďalšími kovmi, ktoré podporujú spevňovanie tuhého roztoku alebo tvorbu karbidov v týchto zliatinách sú: tantal, niób, zirkón, vanád, a titán. Z netradičných prvkov sa tu vyžíva aj ytrium, pre zlepšenie odolnosti voči oxidácii. Hojne využívanou technológiou v súvislosti s liatymi zliatinami kobaltu pre vysokoteplotné použitie je odlievanie na tzv. vytaviteľný model (oblasť konštrukcie prúdových motorov). [25]

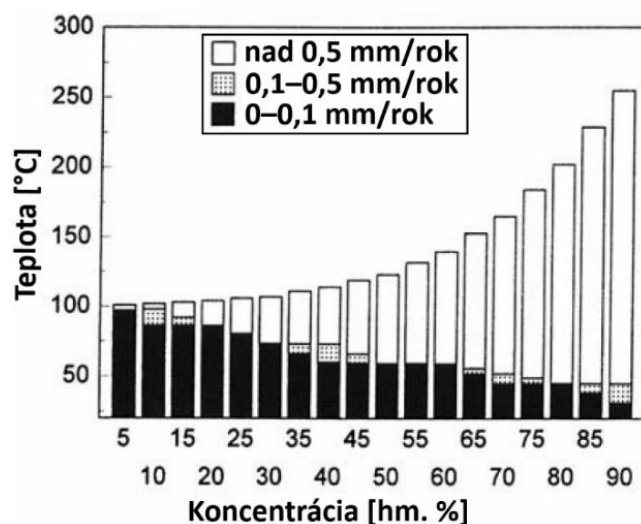
### 2.5.3 Kobaltové zliatiny s odolnosťou voči korózii od roztokov a opotrebeniu

Kľúčovými prvkami týchto zliatin sú: kobalt, chróm a molybdén. Ako konkrétne príklady možno uviesť zliatiny Vittalium® alebo Ultimet®. Vittalium® v odlíatom stave obsahuje dostatočné množstvo uhlíka na vytvorenie karbidov  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  po hraniciach zŕn, na rozdiel od tvárnenej zliatiny Ultimet® (požaduje rozpúšťacie žihanie s ochladením do vody), kde sa precipitáty vyskytujú vo forme nitridov. Charakteristiky kobaltových zliatin, ktoré stoja za ich odolnosťou voči opotrebeniu (vrátane odolnosti voči mikroúnave) boli popísané vyššie. Rovnako je to aj u zliatin Vittalium® a Ultimet®. Na obrázku 2.8 sú znázornené výsledky testu opotrebenia, podľa normy ASTM G 98.



Obr. 2.8 Veľkosť poškodenia vybraných materiálov z testu opotrebenia podľa ASTM G98, dvojice z rovnakého materiálu (316L – ČSN 17 349, 410 – ČSN 17 021, 2205 – ČSN 17 381, 17-4 PH – EN X5CrNiCuNb17-4) [26].

V prípade Ultimet® bola najviac prostredníctvom pridania niklu (9 hm. %) znížená teplota transformácie HCP na FCC, kvôli redukcii mechanického spevňovania a lepšej tvárnosti. Aj u týchto zliatin samozrejme dochádza k pasivácii vplyvom prítomnosti chrómu a kyslíku, ktoré sú kľúčovými s ohľadom na koróznú odolnosť v roztokoch, napr. ako kyselina sírová. Molybdén (spolu s volfrámom, v prípade Ultimet®) umožňuje použitie v aktívnom koróznom prostredí, napr. kyselina chlorovodíková. Ďalšími dôležitými prísadami sú u Ultimet® dusík a uhlík. Pôvodným zámerom bolo uhlíku sa vyhnúť, pretože by mohol spôsobovať skrehnutie prostredníctvom precipitácie karbidov na hraniciach zŕn za zvýšených teplôt (napr. zvarovanie), ako u nehrdzavejúcich ocelí alebo zliatiny Hastelloy®. Bolo však zistené, že v systéme kobalt-chróm-molybdén sa uhlík rozpúšťa lepšie a navyše zvyšuje odolnosť voči praskaniu vplyvom napätia a korózie, ak je pridaný v rozumnom množstve. Podobne pôsobí aj dusík, ktorý je rozpustný do cca 0,12 hm. % a zvyšuje pevnosť a odolnosť voči lokálnej korózii (pitting). Graf na obrázku 2.9 znázorňuje ako zliatina Ultimet® reaguje v prostredí kyseliny sírovej. Vrcholy stĺpcov uvádzajú teplotu varu roztoku. Biele časti tvoria už nebezpečnú oblasť. [26]



Obr. 2.9 Stĺpcový graf degradácie povrchu zliatiny Ultimet® v prostredí kyseliny sírovej, v závislosti od jej koncentrácie a teploty [26].

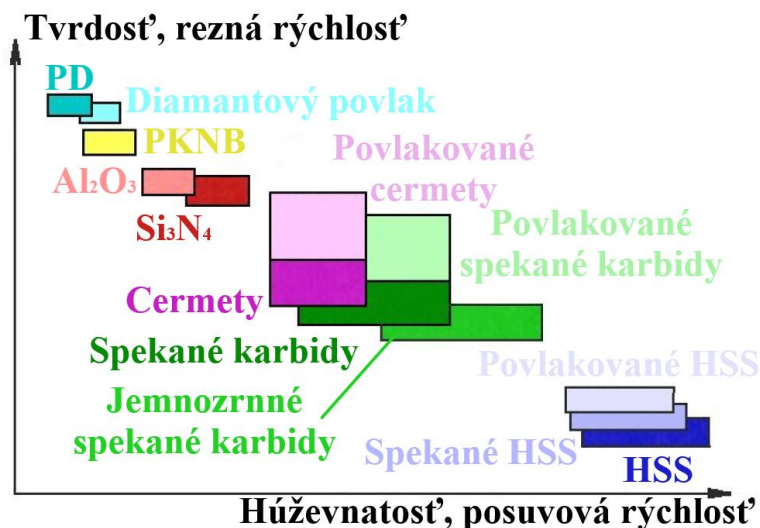
Pri prehliadaní katalógov od výrobcov obrábacích nástrojov bola s ohľadom na kobaltové zliatiny najviac skloňovanou zliatina Haynes® 25, určená pre vysokoteplotné použitie. Do tejto kategórie patrí však aj zliatina UmCo50, ktorej je venovaná samostatná podkapitola nižšie, preto bude tabuľka s detailmi vybranej kobaltovej zliatiny v tejto časti vynechaná.

### 3 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

Táto kapitola je venovaná problematike rezných materiálov. Je tu uvedené ich rozdelenie so stručným popisom. Pozornosť je tu venovaná predovšetkým na spekané karbidy, pretože práve tento druh nástrojového materiálu bol použitý v praktickej časti tejto práce. Jedna podkapitola je venovaná taktiež druhom opotrebovania rezných nástrojov. Na záver kapitoly boli vybrané niektoré odporúčania k obrábaniu materiálov, na ktoré sa zameriava táto práca.

#### 3.1 Druhy rezných materiálov

V súčasnej dobe trh ponúka celé spektrum nástrojových materiálov, vrátane širokého výberu tvarov. Každý materiál disponuje svojimi pozitívami a negatívami, z čoho sa odvíja aj jeho použitie. Kľúčovými vlastnosťami týchto materiálov sú: tvrdosť, ohybová pevnosť a maximálna pracovná teplota. Rozdelenie nástrojových materiálov podľa oblasti použitia je znázornené na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Oblasti použitia jednotlivých nástrojových materiálov [7].

#### 3.2 Spekané karbidy

Spekané karbidy možno podľa použitia rozdeliť do troch základných skupín. Prvou z nich je skupina K, určená pre materiály, ktoré sa pri obrábaní vyznačujú tvorbou delenej, drobivej triesky. Vid' aj tabuľka 2.1 – materiály ISO K. Zloženie tvorí: WC, Co (spojivo) a karbidy (TaC.NbC), zabráňujúce rastu zrna hlavných karbidických fáz. Kľúčovú zložku tvorí WC. Oproti TiC, má WC nevýhodu vo forme straty tvrdosti za zvýšených teplôt. Pri tvorbe dlhej triesky je čelo výrazne viac zaťažované, pretože medzi ním a trieskou dochádza k treniu a následne k zvyšujúcej sa teplote substrátu. To je dôvod obmedzenia použitia len na krátku, drobivú triesku. [7]

Skupina P je naopak vhodná k obrábaniu materiálov, tvoriacich plynulú, dlhú triesku. Veľmi často možno aj naraziť na triesku v tvare špirály. Vid' aj tabuľka 2.1 – materiály ISO P. Zloženie tvorí: WC, TiC, Co (spojivo) a karbidy (TaC.NbC), zabráňujúce rastu zrna hlavných karbidických fáz. Prímes vo forme TiC zabezpečuje odolnosť voči difúznym pochodom za vysokých teplôt, čo je jednou z príčin vytvárania žliabku na čele. Negatívom TiC je krehkosť a nižšia odolnosť voči abrazívnej forme opotrebovania, v porovnaní s WC. [7]

Spekané karbidy typu M mají zväčša univerzálne použitie. Sú určené k obrábaniu materiálov ISO M – vid' tabuľka 2.1. Materiály tvoriace strednú až dlhšiu triesku. Zloženie tvorí: WC, TiC, karbidy TaC.NbC a Co (spojivo). Disponujú vysokou húževnatosťou a nemajú problém s ťažkým hrubovaním, či prerušovaným rezom. [7]

Výrobcovia nástrojových materiálov sa však neustále snažia posúvať svoje produkty vpred a vyvíjajú materiály pomocou vlastných patentov. Zloženie daných materiálov sa môže značne líšiť od základného prehľadu, uvedeného vyššie. Často ide o typy spekaných karbidov, ktoré majú komplexné vlastnosti a sú schopné obrábať viacero skupín materiálov obrobkov, nie sú obmedzené len na jednu.

Skupiny spekaných karbidov sa ďalej delia na triedy, označené dvojčísľím (napr. M20–M35). So stúpajúcim dvojčísľím stúpa aj podiel spojiva v zmesi. Znamená to, že ide o zmes s väčšou húževnatosťou, ktorá je vhodná skôr ku hrubovaniu (nižšie rezné rýchlosti a vyššie posuvy). K dokončovacím operáciám (vysoká rezná rýchlosť, nízke hodnoty posuvu a šírky záberu hlavného ostria) je lepšie použiť triedy v rozsahu 01–10. Nižší obsah spojiva má za následok: vyšší obsah karbidov, väčšia odolnosť voči difúzii, väčšia odolnosť voči plastickej deformácii a zvýšená krehkosť. [1]

Neoddeliteľnou súčasťou spekaných karbidov sú ich povrchové úpravy – povlaky. Pomocou povlakovania je možné značne vylepšiť vlastnosti daného nástrojového materiálu. K realizácii povlakov sa využívajú dve metódy: CVD a PVD. Rozdiely v týchto dvoch metódach sú zhrnuté v tabuľke 3.1. Tabuľka 3.2 znázorňuje bežne využívané typy povlakov a zhodnotenie ich vlastností.

Tab. 3.1 Stručný princíp a porovnanie metód CVD a PVD [7].

CVD	PVD
Chemické naparovanie z plynnej fázy	Fyzikálne naparovanie
Dochádza k chemickej reakcii tesne nad povrchom substrátu, pričom produkty z reakcie sa ukladajú na povrch. Plyn, nesúci stabilnú, a zároveň prchavú zlúčeninu (napr. chlorid titaničitý) sa vplyvom tepelného účinku chemicky rozpadá. K reakcii je nutný aj nekovový, reaktívny plyn (napr. metán), a taktiež nosný plyn (napr. vodík). Nosný plyn umožňuje veľmi dobrú reguláciu celého procesu.	Ide o proces, ktorý prebieha vo vákuu. Čistý kov (najčastejšie Ti) je pomocou tepelného účinku odparovaný (napr. elektrickým oblúkom). Následne dochádza k reakcii medzi atmosférou komory a emitovanými atomárnymi časticami. Atmosféra komory sa skladá z reaktívneho a inertného plynu (napr. dusík a argón). Produkty z reakcie dopadajú na povrch, kde tvoria súvislú vrstvu povlaku.
Teploty 900–1200 °C	Teploty 180–600°C
Ovplyvnenie substrátu – zníženie ohybovej pevnosti, ťahové zostatkové napätia v povlaku	Neovplyvňuje nepriaznivo pôvodný substrát, tlakové zostatkové napätia v povlaku
Nemožnosť povlakovania ostrých hrán	Povlakovanie ostrých hrán
Výborná adhézia povlaku a substrátu	Náročnejšia príprava povrchu pred procesom
Možnosť naniesenia vrstiev o hrúbke až 13 μm	Možnosť naniesenia vrstiev o hrúbke len 5 μm
Variabilita typov povlakov	Menšia možnosť výberu povlaku
Bezproblémové povlakovanie zložitejších tvarov bez nutnosti pohybu	K povlakovaniu všetkých strán tela substrátu je nutný neustály pohyb



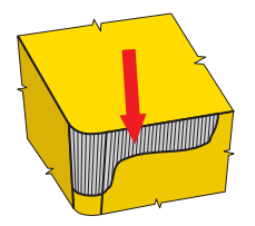
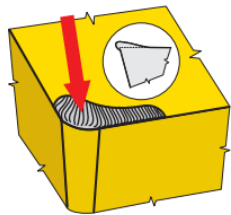
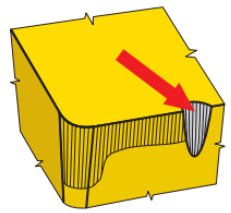
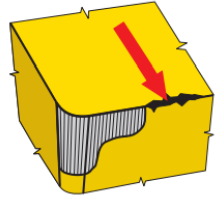
Tab. 3.2 Zhodnotenie vlastností bežne využívaných povlakov [7].

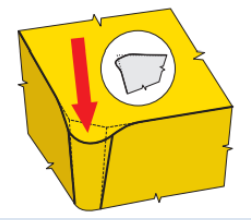
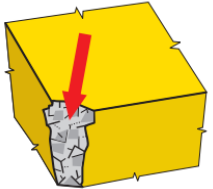
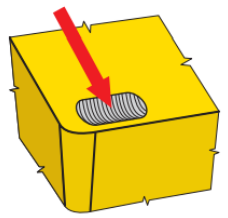
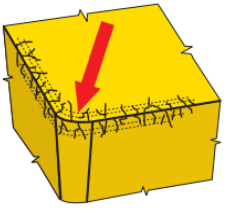
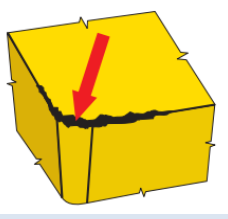
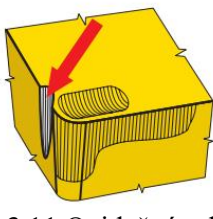
Chemická stabilita	Odolnosť voči oxidácii	Tvrdosť	Tvrdosť za vysokých teplôt
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
TiAlN	TiAlN	TiCN	TiAlN
TiN	TiN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiN
TiCN	TiCN	TiAlN	TiCN
TiC	TiC	TiN	TiC

### 3.3 Formy opotrebenia rezných materiálov

Druhy opotrebenia rezných nástrojov a možnosti ich minimalizácie sú obsahom tab. 3.3.

Tab. 3.3 Druhy opotrebenia rezných nástrojov [10; 28].

Druh opotrebenia	Príčina	Opatrenia ku minimalizácii
 <p>Obr. 3.2 Oter chrbta (obr. 3.2–3.10 [10]).</p>	<p>Tvrde častice materiálu obrobnku (napr. martenzit alebo karbidy) abrazívne opotrebovávajú chrbtovú časť nástroja. Zväčša možno sledovať rovnomerné opotrebenie. Nerovnomerný výskyt znamená prítomnosť ďalších foriem opotrebenia.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- použitie substrátu s väčšou odolnosťou voči oteru</li> <li>- použitie tvrdšieho povlaku</li> <li>- zníženie rezných rýchlostí</li> <li>- použitie účinnejšieho chladenia</li> <li>- zväčšenie uhlu chrbta</li> <li>- môže pomôcť aj väčší polomer špičky nástroja</li> </ul>
 <p>Obr. 3.3 Tvorba nárastku.</p>	<p>Príčinou tvorby nárastku je adhézia. Vzniká za vysokých tlakov, príp. pri styku materiálov s chemickou afinitou. Pri odtrhávaní môže so sebou odnášať častice materiálu rezného nástroja, čo spôsobuje opotrebenie v tvare vrubu, prípadne iné.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zmena typu substrátu, prípadne povlaku</li> <li>- všeobecne sa odporúča zvýšiť reznú rýchlosť a posuv</li> <li>- použitie pozitívnejšej geometrie</li> <li>- použitie chladenia s lepším mazacím účinkom</li> </ul>
 <p>Obr. 3.4 Vrubové opotrebenie chrbta.</p>	<p>Vzniká vplyvom krátkodobého preťaženia reznej hrany tvrdou abrazívnou časticou, príp. sa často vyskytuje aj pri obrábaní deformačne spevnenej, povrchovej vrstvy, z predchádzajúceho prejazdu.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zmena šírky záberu hlavného ostria</li> <li>- použitie substrátu s väčšou húževnatosťou</li> <li>- použitie menej pozitívnej geometrie</li> </ul>
 <p>Obr. 3.5 Krehké porušenie reznej hrany na konci záberu.</p>	<p>Súvisí s problematikou nevhodného utvárania triesok a ich odvodu z miesta rezu.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- použitie substrátu s menšou zrnitosťou</li> <li>- odporúča sa použitie PVD povlaku</li> <li>- zmena typu utvárača</li> <li>- použitie správnych rezných podmienok</li> <li>- použitie menej pozitívnej geometrie</li> </ul>

 <p>Obr. 3.6 Plastická deformácia v oblasti špičky.</p>	<p>Hlavnou príčinou je zmäknutie spojiva vplyvom tepelného preťaženia, s následným poklesom pevnostných charakteristík substrátu. Tlak na nástroj zdeformuje ostrie a špičku.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- použitie substrátu s väčšou odolnosťou voči oteru</li> <li>- zníženie reznej rýchlosti a posuvu</li> <li>- použitie pozitívnejšej geometrie</li> <li>- použitie procesnej kvapaliny, príp. zvýšiť tlak</li> </ul>
 <p>Obr. 3.7 Krehké porušenie v oblasti špičky.</p>	<p>Vzniká mechanickým preťažením nástroja vplyvom rázového zaťaženia (nehomogenita materiálu alebo nestabilita sústavy stroj-nástroj-obrobok). Dôvodom preťaženia môže byť aj degradácia pôvodných vlastností substrátu.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zvoliť substrát s vyššou húževnatosťou</li> <li>- znížiť hodnotu posuvu a šírky záberu hlavného ostria</li> <li>- zvoliť menej pozitívnu geometriu</li> <li>- kontrola tuhosti sústavy stroj-nástroj-obrobok</li> </ul>
 <p>Obr. 3.8 Tvorba žliabku na čele.</p>	<p>Spôsobuje ho kombinácia difúzneho a abrazívneho poškodenia. Dochádza k migrácii častíc medzi materiálom nástroja a trieskou.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zvoliť substrát s väčšou odolnosťou voči oteru</li> <li>- zvoliť povlak s väčšou teplotnou stabilitou (<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>)</li> <li>- zníženie reznej rýchlosti</li> <li>- použitie pozitívnejšej geometrie</li> <li>- použitie procesnej kvapaliny, príp. zvýšiť tlak</li> </ul>
 <p>Obr. 3.9 Tvorba hrebeňových trhlín.</p>	<p>Dôsledok tepelného a mechanického zaťažovania nástroja, obzvlášť pri pôsobení tepelných cyklov. Najčastejšie sa vyskytujú u frézovania.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zníženie reznej rýchlosti a posuvu</li> <li>- použitie menej pozitívnej geometrie</li> <li>- použiť iný typ procesnej kvapaliny, príp. obrábať bez nej</li> </ul>
 <p>Obr. 3.10 Krehké porušenie rez. hrany (mikrodeštrukcia).</p>	<p>Tento druh opotrebenia súvisí najmä s nestabilitou sústavy stroj-nástroj-obrobok. Takisto ho môže spôsobovať aj prítomnosť jemných, tvrdých častíc v materiáli obrobku. Možnou príčinou je aj ťahová napätosť pri tvorbe nárastku.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- použitie substrátu s väčšou húževnatosťou</li> <li>- zvýšenie tuhosti sústavy stroj-nástroj-obrobok</li> <li>- zníženie posuvu</li> <li>- použitie menej pozitívnej geometrie</li> </ul>
 <p>Obr. 3.11 Oxidačná ryha na vedľajšej hrane.</p>	<p>Je výsledkom chemických reakcií (za prítomnosti kyslíku), prebiehajúcich na povrchu vedľajšej reznej hrany.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- použitie substrátu s väčšou odolnosťou voči oteru</li> <li>- použitie povlaku s lepšou tepelnou stabilitou</li> <li>- zníženie reznej rýchlosti a posuvu</li> <li>- použitie procesnej kvapaliny, príp. zvýšenie jej tlaku</li> </ul>

## 4 NÁVRH EXPERIMENTÁLNEJ ČASTI

Problematika obrábania kobaltových zliatin nie je v literatúre tak rozsiahlo spracovaná, ako je tomu napríklad v prípade niklových zliatin. Na základe ponuky z ÚST-odboru zlievarenstva, v podobe vzoriek z kobaltovej zliatiny pre účely experimentu v oblasti obrábania, bolo zvažovaných viacero variantov experimentu. Napokon bolo rozhodnuté, že experimentálna časť tejto diplomovej práce bude smerovať k zostrojeniu tzv. Taylorovej závislosti. Vzhľadom na vysokú cenu obrábaného materiálu (cena 1 kg kobaltu cca 6000 Kč) boli zrealizované aj merania ďalších parametrov (viď podkapitola 4.4).

Experimentálnu časť tejto práce tvorí návrh experimentu (voľba sústavy stroj-nástroj-obrobok, voľba meraných veličín), zrealizovanie experimentu a následné vyhodnotenie nameraných hodnôt. Jednotlivé časti sú spracované v podkapitolách nižšie.

### 4.1 Špecifikácia obrábacieho stroja a technológie

Pozdĺžne sústruženie vonkajšej valcovej plochy sa zdalo byť najvhodnejšou a zároveň aj vcelku jednoduchou alternatívou pre experiment. V prospech sústruženia bol aj fakt, že nedochádza k prerušovaniu rezu, na rozdiel od frézovacích operácií.

Požiadavky experimentu na obrábací stroj neboli nijak zásadné. Jedinou vážnejšou požiadavkou, ktorú mal stroj spĺňať bola plynulá regulácia otáčok, z dôvodu zabezpečenia konštantnej reznej rýchlosti pri zmenšujúcom sa priemere obrobku. Pre potreby experimentu bol teda využitý stroj na dielni ÚST-odboru technológie obrábania. Konkrétne sa jednalo o typ TOS SU 50 A 1500.

### 4.2 Špecifikácia obrábacieho nástroja a rezných podmienok

K zostrojeniu závislosti trvanlivosti rezného nástroja na reznej rýchlosti je potrebné sledovať opotrebenie rezného nástroja. Pre lepšiu výpovednú hodnotu celej úlohy bolo pri návrhu rozhodnuté, že sa pri každej reznej rýchlosti bude opotrebenie na chrste sledovať súčasne na troch vymeniteľných rezných doštičkách (VRD 1, VRD 2 a VRD 3), resp. troch rezných hranách. Ak by sa opotrebenie sledovalo iba na jednej reznej hrane mohli by byť výsledky značne skreslené, pretože by mohlo nastať jej predčasné zničenie, ku ktorému by pri inej reznej hrane nedošlo (napr. krehké porušenie spôsobené veľkou nečistotou v materiáli obrobku, príp. chybná VRD). Tieto predpoklady sa neskôr aj naplnili a potvrdili správnosť tohto kroku pri návrhu.

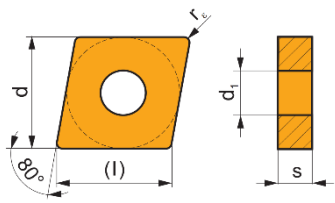
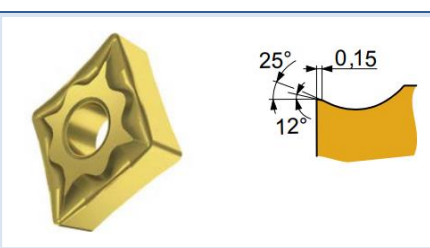
#### 4.2.1 Vymeniteľná rezná doštička a držiak

Ako rezný materiál do experimentu bola zvolená vymeniteľná rezná doštička zo spekaného karbidu rady T8300 firmy Dormer Pramet s.r.o., konkrétne ide o triedu T8330. Podľa dostupných zdrojov sa jedná o materiál tvorený kombináciou jemnozrnného substrátu ( $< 1 \mu\text{m}$ ) na báze WC-Co a PVD povlaku. Povlak obsahuje nanovrstvy na báze TiN/TiAlN s gradientnými prechodmi. Pre zlepšenie odolnosti voči vzniku nárazu a lepšej identifikácii opotrebenia je povrch opatrený vrstvou žltého TiN. Povlak by sa dal charakterizovať ako kompromis medzi vysokou tvrdosťou, húževnatosťou a výbornou adhéziou k podkladovému spekanému karbidu. Výrobca tento materiál popisuje ako najuniverzálnejšieho člena z rady T8300, odporúča

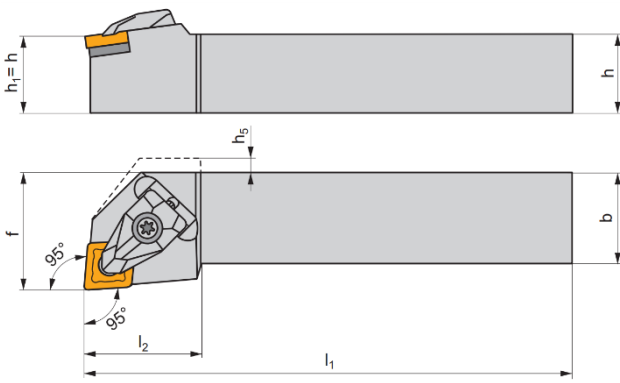
ho predovšetkým pre nehrdzavejúce ocele ale aj ostatné skupiny. Ďalšie detaily použitej vymeniteľnej reznej doštičky sú uvedené v tab. 4.1. [10; 29]

Použitý držiak vymeniteľnej reznej doštičky a jeho geometria sú prehľadne spracované v tabuľke 4.2.

Tab. 4.1 Parametre použitého rezného materiálu (vymeniteľnej reznej doštičky) [10].

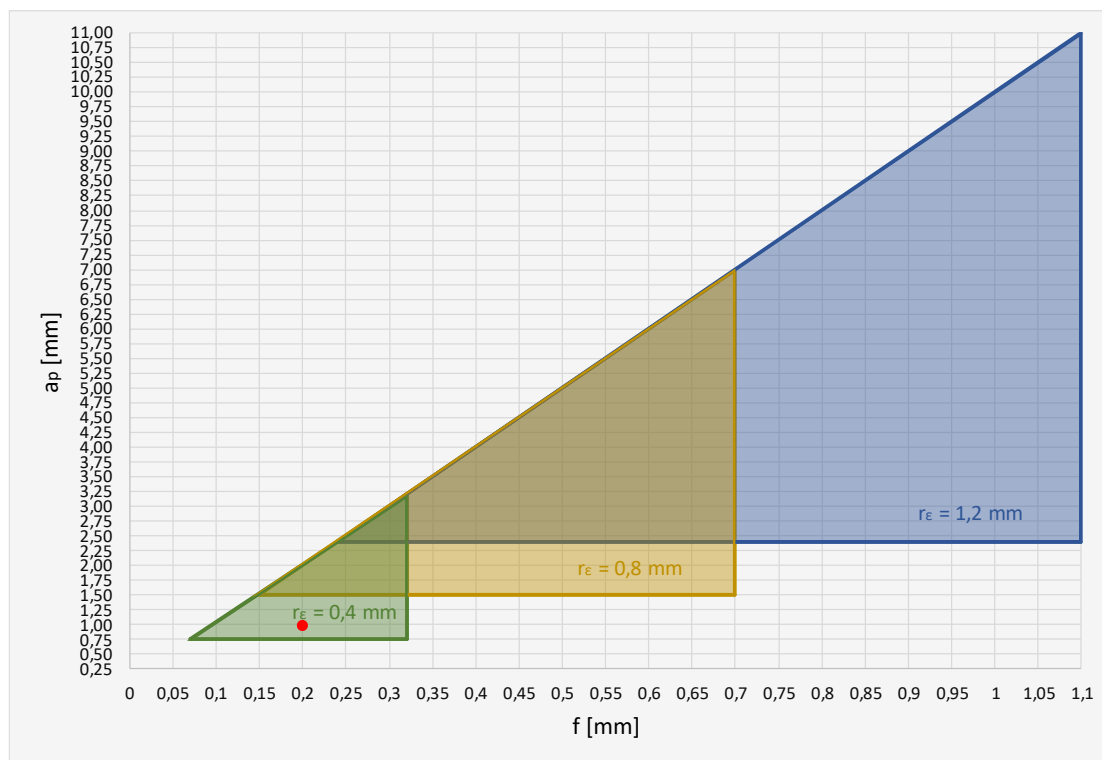
Označenie	CNMG 120404E-NF T8330
Skupina	M20-M35 (S15-S25)
$v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	25–60
$f$ [mm]	0,13–0,21
$a_p$ [mm]	0,4–2,4
Geometria	 <p>Obr. 4.1 Geometria VRD (<math>d = 12,7</math> mm, <math>d_1 = 5,16</math> mm, <math>l = 12,9</math> mm, <math>s = 4,76</math> mm, <math>r_e = 0,4</math> mm) [10].</p>
Utvárač triesky	 <p>Obr. 4.2 Tvar VRD a detail utvárača triesky NF [30].</p>

Tab. 4.2 Držiak vymeniteľnej reznej doštičky [10].

Označenie	DCLNR 2525 M12
Geometria	 <p>Obr. 4.3 Držiak VRD (<math>h = 25</math> mm, <math>b = 25</math> mm, <math>f = 32</math> mm, <math>l_1 = 150</math> mm, <math>l_2 = 30</math> mm) [10].</p>
$\lambda_s$ [°]	-6
$\gamma_o$ [°]	-6

### 4.2.2 Voľba rezných podmienok

Voľba rezných podmienok (rezná rýchlosť, posuv, šírka záberu hlavného ostria, prípadne rezná prostredie) bola zrealizovaná na základe odporúčania výrobcu zvoleného rezného materiálu. Vzhľadom na obmedzené množstvo testovacieho materiálu bolo pri voľbe rezných rýchlostí potrebné navrhnuť také hodnoty, aby sa mohli otestovať ideálne štyri rôzne rezné rýchlosti (prípadne viac), pre čo najlepšie vykreslenie T- $v_c$  závislosti. Na základe katalógu [10] bola zvolená prvá rezná rýchlosť  $40 \text{ m.min}^{-1}$ . Pri samotnom realizovaní experimentu bolo rozhodnuté, že ďalšie rezné rýchlosti sa budú voliť vyššie ako je hodnota  $40 \text{ m.min}^{-1}$ . Ďalšími zvolenými hodnotami boli  $50 \text{ m.min}^{-1}$  a  $80 \text{ m.min}^{-1}$ . Hodnota posuvu a šírky záberu hlavného ostria boli zvolené:  $f = 0,2 \text{ mm}$ ,  $a_p = 1 \text{ mm}$ , čo je v súlade s odporúčaním výrobcu rezného nástroja a takisto normou [31]. Na obrázku 4.4 možno vidieť odporúčané hodnoty  $f$  a  $a_p$  pre jednotlivé polomery špičiek rezných nástrojov, podľa uvedenej normy. Je tam znázornený aj červený bod, ktorý leží v priesečníku zvolených podmienok pre tento experiment. Počas experimentu neboli použité žiadne procesné kvapaliny (chladiace alebo mazacie látky). Výrobca zvoleného rezného nástroja navyše vo svojom katalógu uvádza, že použitie procesných kvapalín životnosť nástroja zásadne neovplyvňuje – má iba mierne pozitívny efekt.



Obr. 4.4 Odporúčané hodnoty posuvu a šírky záberu hlavného ostria pre jednotlivé polomery špičiek podľa normy [31].

### 4.3 Špecifikácia obrobku

Ako bolo spomenuté vyššie, testovaným materiálom bola kobaltová zliatina UmCo50. Vybrané vlastnosti sú zhrnuté v tabuľke 4.3. Ide o zliatinu pre vysokoteplotné použitie. Nasvedčujú tomu aj jej typické aplikácie. Používa sa na výrobu napr. roštov, podstavcov, valcov alebo koľajníc pre zariadenia k procesom tepelného spracovania (pece). Taktiež je táto zliatina využiteľná aj pre komponenty vysokých pecí (oblasť odpichu trosky), prípadne medzipanvy. [25]



Pre účely experimentu bol dodaný materiál v odlíatom stave, bez tepelného spracovania. Aby bolo možné materiál sústružiť, bolo potrebné odliatok vo viacerých krokoch upraviť.

#### 4.3.1 Příprava vzorky pre experiment

Tavba materiálu UmCo50 bola realizovaná v školskej zlievarni ÚST-odboru zlievarenstva, VUT v Brne. Jednalo sa o tavbu vo vákuovej peci Consarc. Od štartu pece po odpich ubehla doba viac ako 5 hodín, vzhľadom na realizáciu experimentu s oduhličiením. Štandardná doba tavby by bola pravdepodobne kratšia. Vsádzku tvorilo 80 kg vratného materiálu z pretavených triesok UmCo50. Tavenie sa začalo spustením predohrevu pece po dobu 1 hodiny a 45 minút. Následne bolo nasadené veko pece a začalo tavenie pod vákuom. Po uplynutí ďalších 25 minút bola vsádzka roztavená. Celkovo sa zrealizovalo 10 meraní obsahu uhlíku [32], z počiatočnej hodnoty 0,3 % až po konečných 0,078 %. Odpichová teplota kovu bola cca 1600 °C. Kov sa odlieval do tzv. Y blokov, ktoré majú vhodný tvar pre zabezpečenie homogenity štruktúry vzoriek. Po odlíatí sa hladina vzoriek zasypala exotermickým zásypom, kvôli minimalizácii väd v odliatku (napr. stiahnutina). Tvar formy a odliatku, spolu so základnými rozmermi je možno vidieť na obr. 4.5.



Obr. 4.5 Forma pred odliatím, po odlíatí, tvar odliatku so základnými rozmermi.

Ďalším krokom bolo delenie odliatku po jeho zatuhnutí. Pre experiment bola použitá spodná časť odliatku, ktorú bolo nutné oddeliť od náliatku. Poznámka: na obr. 4.5 je však odliatok s kótami položený náliatkom smerom dolu. Rezanie bolo realizované na gravitačnej pásovej píle BOMAR ERGONIMIC 320.250 DG. Pričný rez cez odliatok (viď obr. 4.6) bol pomerne náročný a trval cca 10 hodín.



Obr. 4.6 Realizácia priečného rezu cez odliatok.

Po oddelení časti určenej pre experiment vzorka putovala do dielne ÚST-odboru obrábania, kde bola realizovaná posledná úprava pred samotným experimentom – úprava lichobežníkového prierezu na valcový. Pokus o úpravu na valcový polotovár pomocou sústruženia už po krátkej chvíli zlyhal, pretože kvôli veľkým rázom a vlastnostiam daného materiálu dochádzalo k okamžitému zničeniu reznej hrany nástroja. Ostré hrany lichobežníkového prierezu bolo nutné zraziť (hrubovať) na frézke, aby sa rázy čiastočne eliminovali. Následne sa znova prešlo k sústruženiu (obr. 4.7) a postupnými krokmi bola úprava vzorky na valcový tvar dokončená. Sústruženie aj frézovanie vzorky sa vyznačovalo pomerne vysokou spotrebou rezných doštičiek. Kvôli úspore nákladov však nešlo výlučne o nové doštičky. Touto úpravou bola zároveň odstránená kôra odlievania, ktorú sa odporúča pred podobnými experimentami odstraňovať [31], pretože by mohla napríklad vďaka prítomnosti abrazívnych nečistôt spôsobiť skreslenie trvanlivosti reznej hrany nástroja. Po konečnej úprave boli rozmery vzorky:  $\phi 53$  mm a dĺžka 250 mm. Celkový počet vzoriek: 2 kusy.



Obr. 4.7 Sústruženie odlievania na valcový prierez po hrubovaní na frézke.

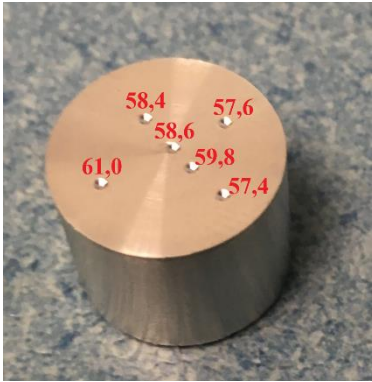
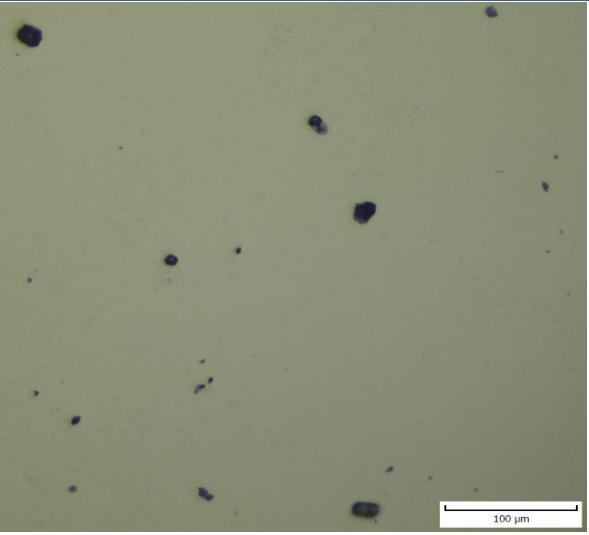
#### 4.3.2 Vlastnosti testovaného materiálu

Zliatina UmCo50 nepatrí medzi najpevnejšie kobaltové zliatiny, avšak vďaka tomu môže vynikať odolnosťou voči tepelným šokom a oteru. Ďalšou jej prednosťou je zvýšený bod tavenia, oproti viacerým kobaltovým alebo niklovým zliatinám. Praktické skúsenosti hovoria, že pri cykle ohriatia na  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  s následným ochladením do vody po dobu 7 sekúnd, sa u tejto zliatiny ani po 500 zopakovaní nezaznamenali praskliny. Čo sa týka odolnosti voči opotrebeniu, zliatina UmCo50 bola aplikovaná ako nástroj ku sintrovaniu sulfidu meďnatého za  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kedy sa po 50 mesiacoch neobjavilo v procese výraznejšie zhoršenie. Na druhej strane, dovtedy používané liatinové nástroje podliehali značnému opotrebeniu, korózii a oxidácii, so životnosťou 3 mesiace. [33]

Mikrostruktúru, výsledky merania tvrdosti, spolu s ďalšími vlastnosťami testovanej zliatiny možno vidieť v tab. 4.3. Obr. 4.9 znázorňuje jej homogénnu štruktúru s FCC mriežkou. Čierne častice tvoria karbidy. Zistenie typu karbidov by však vyžadovalo hlbšiu analýzu. Ďalšie metalografické snímky vid' príloha 8.

Z hľadiska koróznej odolnosti sa zliatina UmCo50 vyznačuje odolnosťou voči roztokom kyseliny sírovej aj vriacej kyseline dusičnej, naopak je však náchylná na pôsobenie kyseliny chlorovodíkovej. Disponuje aj vysokou odolnosťou voči horúcej korózii v oxidačno-sulfatačných prostrediach (napr. produkty spaľovania vykurovacích olejov s obsahom síry). Odolnosť voči oxidačnému prostrediu (na vzduchu) až do 1200 °C. Nie je náchylná ani na pôsobenie roztavenej medi, neplatí to však pri hliníku. [25]

Tab. 4.3 Mechanické vlastnosti, základné fyzikálne vlastnosti a mikroštruktúra zliatiny UmCo50 (stav po odliatí).

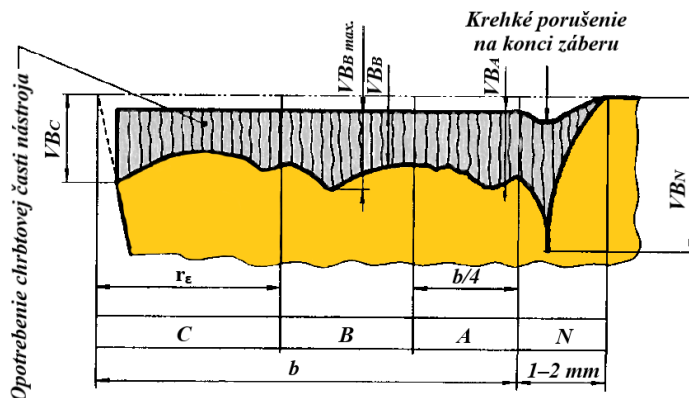
UmCo50	
<b>Chemické zloženie</b> [%] [34]	48,9 Co, 26,08 Cr, 24,23 Fe 0,31 Mn, 0,4 Cu, 0,078 C
<b>R<sub>p0,2</sub></b> [MPa] [25]	315
<b>R<sub>m</sub></b> [MPa] [25]	550
<b>HRA</b>	 <p>Obr. 4.8 Výsledky skúšky merania tvrdosti podľa Rockwella (vzorka <math>\phi</math> 16 mm).</p>
<b><math>\rho</math></b> [kg.m <sup>-3</sup> ] [25]	8050
<b><math>\lambda</math></b> [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] [25]	8,9
<b>A<sub>5</sub></b> [%] [25]	8
<b>Mikroštruktúra</b>	 <p>Obr. 4.9 Snímka mikroštruktúry testovanej zliatiny UmCo50.</p>



#### 4.4 Špecifikácia meraných parametrov

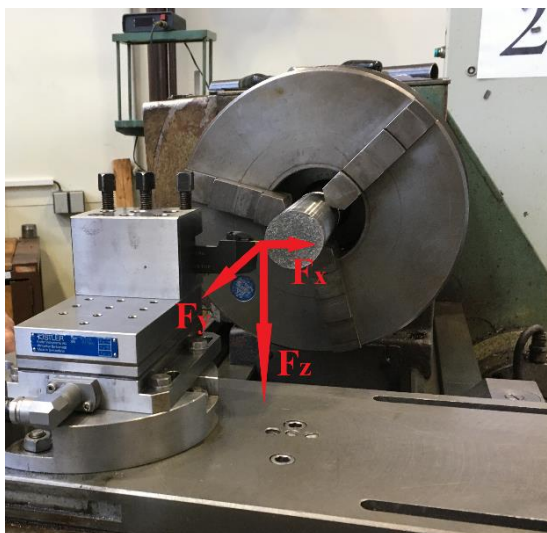
Úlohou experimentálnej časti bolo sledovanie opotrebenia rezného nástroja v čase, čoho výsledkom mala byť  $T-v_c$  závislosť. Počas priebehu experimentu sa však realizovali aj merania ďalších parametrov:

- šírka fazetky opotrebenia na chrbte rezného nástroja  $VB_B$  (obr. 4.10), v jednotkách mm, ktorá by mala byť meraná v oblasti B a od pôvodnej polohy reznej hrany (poznámka: za podmienok uvedených v časti 4.2.2),



Obr. 4.10 Kritéria opotrebenia rezného nástroja [31].

- čas reznej hrany nástroja v reze v minútach (stanovené výpočtom na základe reznej rýchlosti, posuvu, aktuálnej veľkosti obrábaného priemeru vzorky a dĺžky prejazdu),
- pôsobiace zložky rezných odporov  $F_y$  a  $F_z$ , a silu  $F_x$  na novej reznej hrane nástroja a pre jednotlivé zvolené rezné rýchlosti, v jednotkách N (viď obr. 4.11),



Obr. 4.11 Smery meraných zložiek  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  (sily definované smerom nástroj  $\rightarrow$  obrobok:  
 $F_c = -F_z$ ,  $F_f = -F_y$  a  $F_p = F_x$ ).

- pôsobiace zložky rezných odporov  $F_y$  a  $F_z$ , a silu  $F_x$  na reznej hrane nástroja na konci trvanlivosti a pre jednotlivé zvolené rez. rýchlosti, v jednotkách N,
- pôsobiacu zložku rezného odporu  $F_z$  na novej reznej hrane nástroja pre reznú rýchlosť  $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a rôzne hodnoty posuvov (0,05 mm, 0,1 mm, 0,15 mm, 0,2 mm, 0,3 mm a 0,32 mm),

- priemerné aritmetické odchýlky profilu (parameter Ra) po prejazdoch nástroja s novou reznou hranou pre jednotlivé zvolené rezné rýchlosti, v jednotkách  $\mu\text{m}$ ,
- priemerné aritmetické odchýlky profilu (parameter Ra) po prejazdoch nástroja s reznou hranou na konci trvanlivosti pre jednotlivé zvolené rezné rýchlosti, v jednotkách  $\mu\text{m}$ ,
- priemerné aritmetické odchýlky profilu (parameter Ra) po prejazdoch nástroja s novou reznou hranou pre  $v_c = 40 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a rôzne hodnoty posuvov (0,05 mm, 0,1 mm, 0,15 mm, 0,2 mm a 0,32 mm), v jednotkách  $\mu\text{m}$ .

#### 4.5 Meracie príslušenstvo

V realizácii experimentu bolo k meraniu vyššie uvedených parametrov použité nasledujúce meracie príslušenstvo:

- parameter  $VB_B$  bol meraný na snímkach chrbtovej časti VRD (v nástrojovej rovine), ktoré boli zhotovené na stolnom skeneri Canon LiDE 400,
- dynamické účinky obrábacieho procesu boli zaznamenávané do notebooku so softvérom DynoWare, prepojeného cez viackanálový laboratórny nábojový zosilňovač Kistler typu 5070A11000, rozbočovač s BNC konektormi do samotného dynamometru Kistler typu 9257B (zosilňovač aj dynamometer vid' obr. 4.12), na ktorom bol upnutý nožový držiak s VRD,



Obr. 4.12 Sústava na meranie dynamických účinkov.

- profilomer typ TR 100 Surface 100 Roughness Tester pre meranie priemernej aritmetickej odchýlky povrchu – parameter Ra (obr. 4.13).



Obr. 4.13 Merací prístroj TR100.

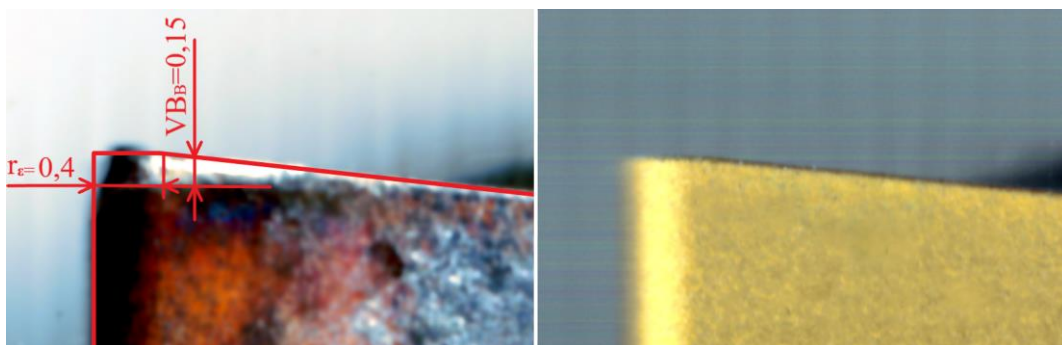
## 5 VÝSTUPY EXPERIMENTÁLNEJ ČASTI

Realizácia experimentálnej časti tejto diplomovej práce bola značne ovplyvnená obmedzeným množstvom testovacieho materiálu a taktiež časovou náročnosťou. Ako bolo spomenuté vyššie, boli k dispozícii iba dve vzorky kobaltovej zliatiny. Napriek uvedeným obmedzeniam bola experimentálna časť zrealizovaná a priniesla nižšie uvedené výsledky.

### 5.1 Sledovanie opotrebenia rezného nástroja v čase

Pri návrhu experimentu bolo pomerne zložité navrhnuť rezné rýchlosti obrábania tak, aby bolo možné vykresliť Taylorovu závislosť. Príliš nízke rezné rýchlosti mohli spôsobiť, že trvanlivosti rezných hrán budú príliš vysoké a nebude dostatočný počet bodov  $[v_{ci}; T_i]$  pre vykreslenie danej závislosti. Z dostupných zdrojov, ktoré sa zaoberajú tematikou obrábania kobaltových zliatin bolo zistené, že zvolené rezné rýchlosti sa pohybovali v rozsahu 20–80 m.min<sup>-1</sup>. Bolo však potrebné tieto hodnoty brať s rezervou, pretože sa jednalo o iné kombinácie nástroj-obrobok (príp. rezné podmienky).

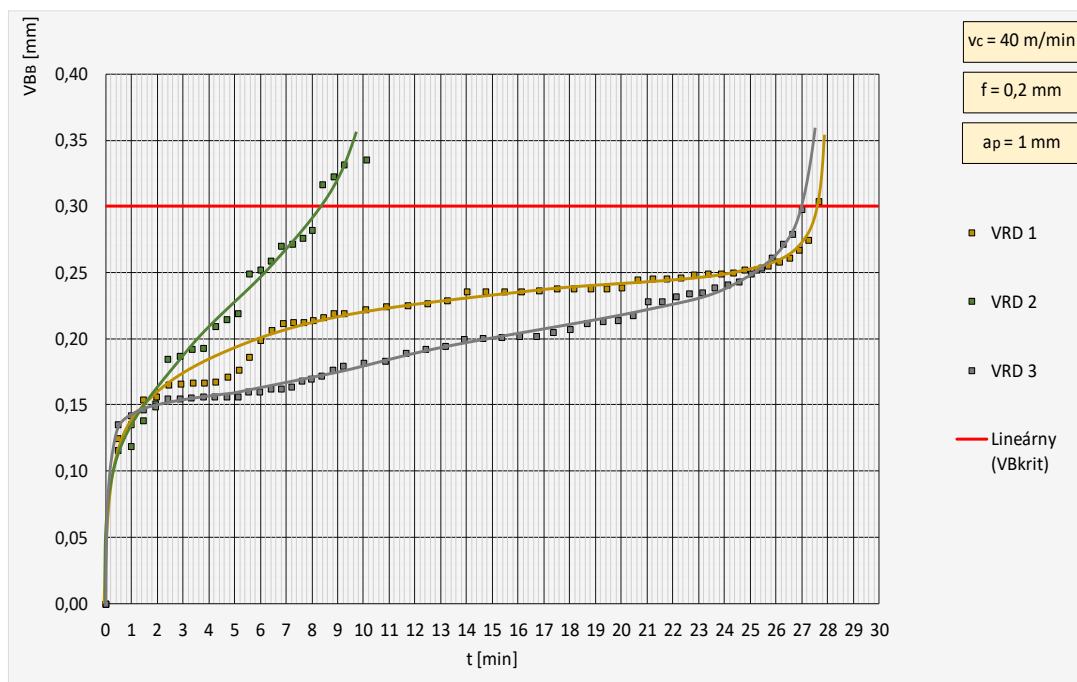
Opotrebenie bolo navyše sledované na troch VRD súčasne, čo spôsobilo ešte vyššie nároky na množstvo testovacieho materiálu. Z tohto dôvodu mohli byť zrealizované merania iba troch testovacích rýchlostí. Ukážku vyhodnotenia parametru  $VB_B$  je možno vidieť na obrázku 5.1. Opotrebenie bolo merané vždy v oblasti B (viď podkapitola 4.4). Za kritickú hodnotu opotrebenia sa považovalo, ak priemerná šírka fazetky opotrebenia chrbta nástroja dosiahla hodnotu  $VB_B = 0,3$  mm. Jednotlivé merania boli realizované vždy po obrobení dĺžky 50 mm alebo 25 mm, v závislosti od aktuálneho priemeru obrobku, či reznej rýchlosti. Tieto meracie kroky sa po zrealizovaní experimentu ukázali ako pomerne krátke (hlavne u  $v_c = 40$  m.min<sup>-1</sup>). Z dôvodu časovej náročnosti sa samotné meranie opotrebenia realizovalo dodatočne, po zhotovení snímok počas experimentu. K metodike merania je ešte nutné poznamenať, že parameter  $VB_B$  bol meraný na každej snímke trikrát, pre minimalizáciu chýb merania z jednotlivých snímok, zhotovených stolným skenerom. Do grafov bola teda vynášaná stredná hodnota z troch meraní.



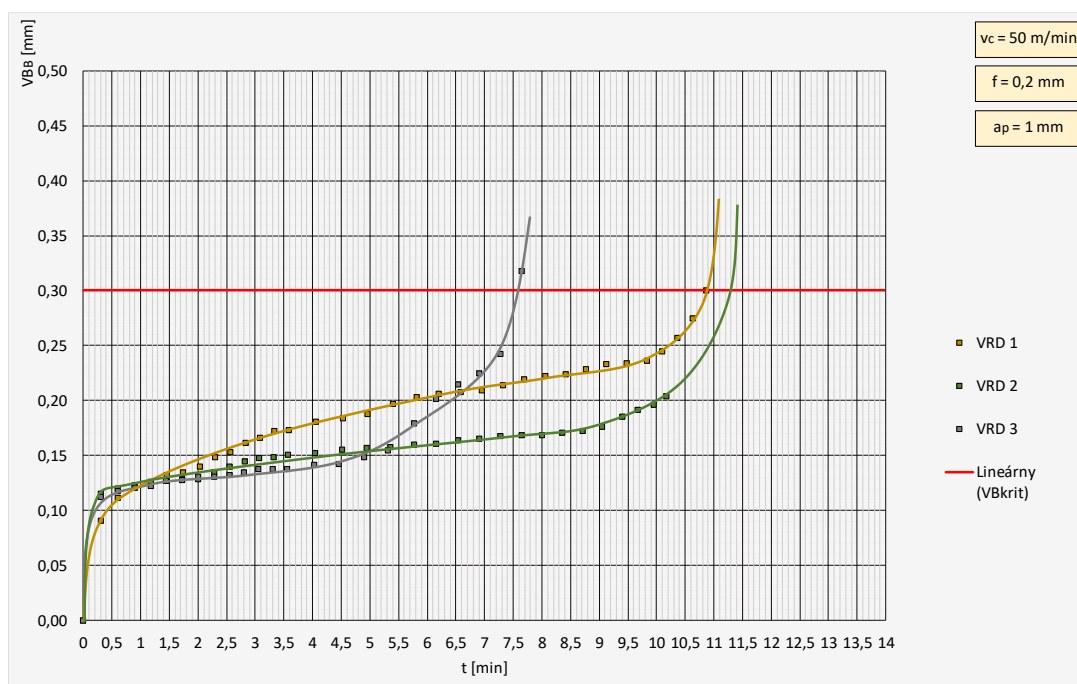
Obr. 5.1 Ukážka vyhodnotenia parametru  $VB_B$  na snímke chrbtovej časti nástroja (rezná hrana na VRD 3,  $v_c = 80$  m.min<sup>-1</sup>, po 2,6 min v reze).

Trvanlivosti rezných hrán pri prvej testovanej rýchlosti 40 m.min<sup>-1</sup> priniesli nasledujúce výsledky: 27,6 min (VRD 1), 8,5 min (VRD 2) a 27,0 min (VRD 3). Trvanlivosť reznej hrany VRD 2 sa značne líšila od zvyšných dvoch VRD. Pri určení výslednej trvanlivosti, ktorá mala byť vynesená do T- $v_c$  závislosti, boli považované za smerodajné rezné hrany na VRD 1 a 3. Trvanlivosť reznej hrany na VRD 2 bola považovaná skôr za chybnú. Výsledná trvanlivosť napokon bola stanovaná na hodnotu:  $T_{vc40} = 27,0$  min. Táto hodnota značne prevyšovala očakávania (10 min).

Preto bolo potrebné ďalšie testovacie rezné rýchlosti zvolit' smerom nahor. To je dôvod voľby rýchlostí  $50 \text{ m.min}^{-1}$  a  $80 \text{ m.min}^{-1}$ . Na obrázkoch 5.2–5.4 sú znázornené krivky opotrebenia  $VB_B$  v čase, ku jednotlivým testovacím rýchlostiam.



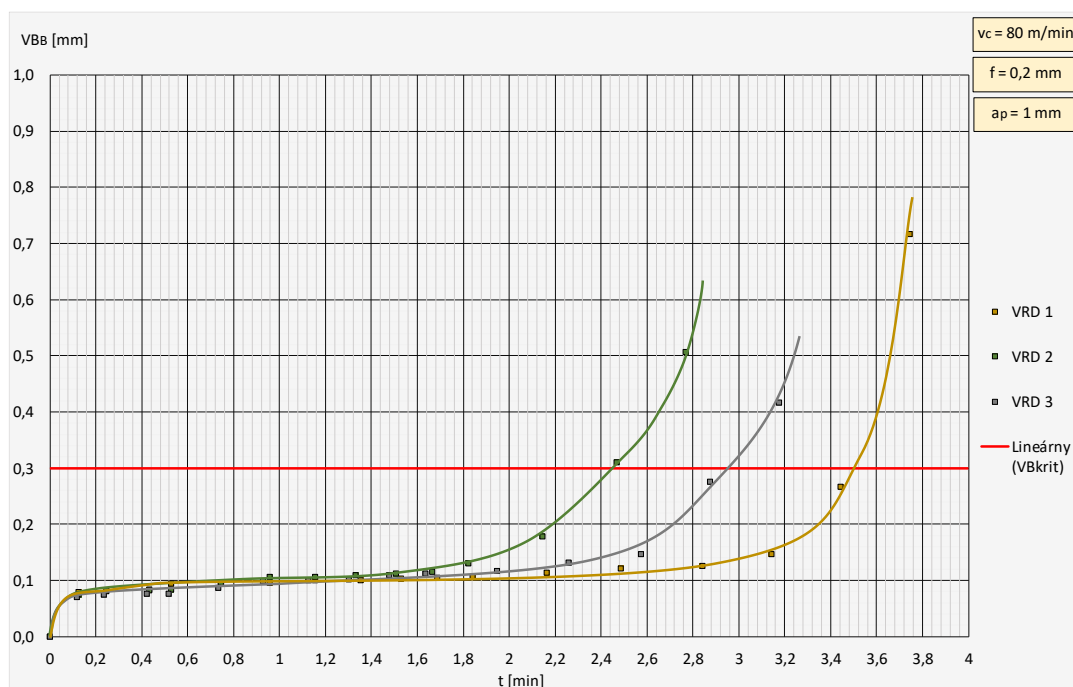
Obr. 5.2 Závislosť opotrebenia chrbtovej časti nástroja  $VB_B$  na čase pre reznú rýchlosť  $40 \text{ m.min}^{-1}$  a VRD 1–3.



Obr. 5.3 Závislosť opotrebenia chrbtovej časti nástroja  $VB_B$  na čase pre reznú rýchlosť  $50 \text{ m.min}^{-1}$  a VRD 1–3.

U reznej rýchlosti  $50 \text{ m.min}^{-1}$  boli trvanlivosti rezných hrán nasledovné: 10,8 min (VRD 1), 7,6 min (VRD 3) a u VRD 2 sa nepodarilo ani po cca 10 min dosiahnuť kritickú hodnotu opotrebenia reznej hrany. Za smerodajnú trvanlivosť bola

u tejto rezní rychlosti považovaná rezná hrana na VRD 1 (prostředná) a výsledná trvanlivost stanovaná na hodnotu:  $T_{vc50} = 11,0$  min.



Obr. 5.4 Závislost' opotrebenia chrbtovej časti nástroja  $VB_B$  na čase pre reznú rychlosť  $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a VRD 1–3.

Posledná testovaná rezná rychlosť  $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  priniesla na testovaných doštičkách nasledujúce výsledky (poradie VRD 1–3): 3,50 min, 2,96 min a 2,45 min. V tomto prípade bola do grafu vynesená hodnota  $T_{vc80} = 3,00$  min, čo reprezentuje strednú hodnotu vyššie uvedených troch hodnôt.



Obr. 5.5 Porovnanie charakteru opotrebenia chrbtovej časti pri  $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  (vľavo) a  $40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  (vpravo), na konci trvanlivosti rezných hrán.

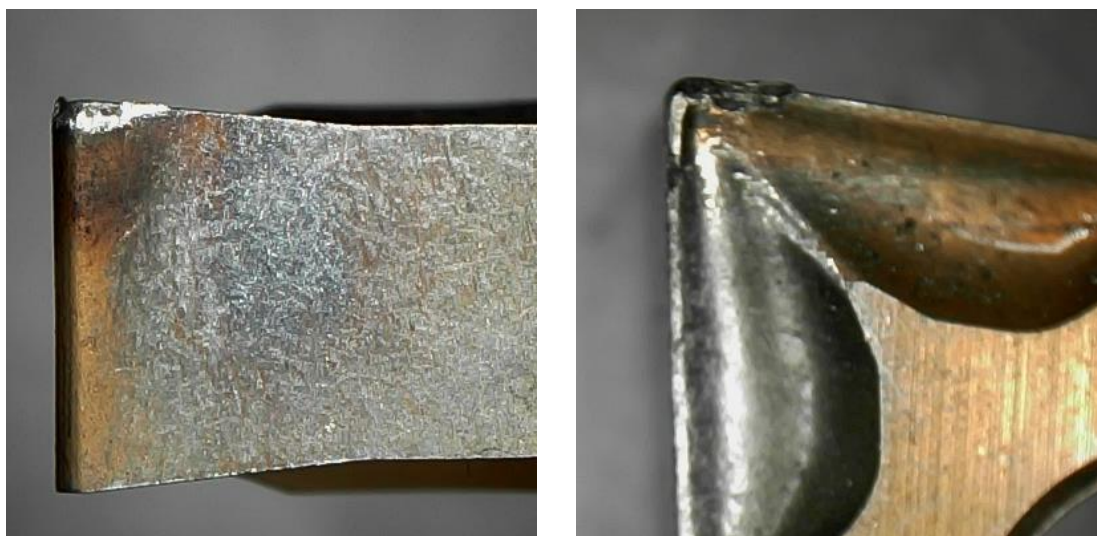
Charakter opotrebenia rezných hrán bol pri rychlostiach  $40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  podobný, u  $v_c = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  sa však zmenil. Okrem štandardného chrbtového opotrebenia dochádzalo u  $40$  a  $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  aj ku vrubovému charakteru opotrebeniu chrbta, prípadne ku krehkému porušeniu rezní hrany na konci záberu. Ako bolo spomenuté vyššie, zvýšenie rezní rychlosti na  $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  zmenilo charakter



opotrebenia rezných hrán. Koniec trvanlivosti nastával pomerne náhle a to vplyvom krehkého porušenia, prípadne plastickej deformácie v oblasti špičky. Rozdiel možno pozorovať na obrázku 5.5. Detailnejšie zábery poškodenia vybraných, testovacích VRD znázorňuje obr. 5.6 a 5.7, kde sú naviac vyobrazené aj čelá. Rezná rýchlosť  $80 \text{ m.min}^{-1}$  sa vyznačovala aj zvýšenou tendenciou k tvorbe nárastku, a to hlavne ku koncu trvanlivosti (viď obrázok 5.8). Tak výrazný tvar nárastku, ako je na obrázku nižšie však vo väčšine prípadov nevznikal. Rezná hrana bola vtedy navyše už výrazne otupená. Snímky ostatných použitých rezných hrán sú obsiahnuté v prílohe 1.



Obr. 5.6 Snímka chrbtovej a čelnej časti VRD 1  
(testovacia rýchlosť  $40 \text{ m.min}^{-1}$ , rezná hrana na konci trvanlivosti).



Obr. 5.7 Snímka chrbtovej a čelnej časti VRD 3  
(testovacia rýchlosť  $50 \text{ m.min}^{-1}$ , rezná hrana na konci trvanlivosti).



Obr. 5.8 Výrazný nárastok na snímke chrbtovej a čelnej časti VRD 1, ktorý vznikol pri obrábání rychlost'ou  $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Z hľadiska tvaru odoberanej triesky bol daný obrábací proces bezproblémový. U všetkých testovacích rýchlostí sa zvolená geometria VRD vyznačovala pomerne dobrou lámavosťou triesky, čo je možno vidieť aj na obr. 5.9. Tvar triesky by sa dal charakterizovať ako delená segmentová trieska [6]. Vplyvom otupenia reznej hrany sa lámavosť prirodzene ku koncu trvanlivosti zhoršila. Ďalšie snímky triesok sú obsiahnuté takisto v prílohe 2. Nebolo však zistené, že by rezná rýchlosť mala na tvar triesky výraznejší vplyv – pri všetkých troch testovacích rýchlostiach boli tvary triesok približne rovnaké.



Obr. 5.9 Tvar triesky pri sústružení testovacou rýchlosťou  $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  (pri prvom prejazde – vľavo, ku koncu trvanlivosti reznej hrany – vpravo).

Otupené rezné hrany sa vyznačovali nárastom silového zaťaženia nástroja (viď podkapitola 5.2), zmenou akustiky, nárastom parametru  $R_a$  (viď podkapitola 5.3), prípadne tvorbou otrepu (obr. 5.10). Otrep by sa dal minimalizovať napríklad zmenšením uhla  $K_r$ . Najviac bol viditeľný u  $v_c = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , čo bolo pravdepodobne spôsobené výrazne väčším porušením geometrie nástroja v oblasti rádiu špičky, na rozdiel od nižších rýchlostí.





Obr. 5.10 Výrazný otrep.

### 5.1.1 Závislosť T-vc

Na základe zmeraných údajov bolo možné pristúpiť ku zostrojeniu závislosti trvanlivosti na rezných rýchlostiach (Taylorova závislosť). Trvanlivosti pre jednotlivé rezné rýchlosti sú zhrnuté v tabuľke 5.1 (pre testovaný materiál).

Súčasťou praktickej časti tejto práce bolo taktiež aj sledovanie opotrebenia zvoleného rezného nástroja pri obrábaní referenčného materiálu – zistenie obrobiteľnosti. Za referenčný materiál bola zvolená ocel ČSN 41 2050.1 (C45+N). Vybrané vlastnosti tohto materiálu a jeho chemické zloženie sú obsiahnuté v prílohe 3. Jedná sa etalónový materiál k testovaniu obrobiteľnosti ocelí. Aj keď testovaný materiál nie je ocel, voľba uvedeného referenčného materiálu bola zrealizovaná, a to predovšetkým na základe jeho cenovej dostupnosti. Obrábanie referenčného materiálu prebiehalo za rovnakých rezných podmienok (geometria nástroja, VRD 1–3,  $f$ ,  $a_p$ , obrábanie nasucho) ako obrábanie testovaného materiálu, s výnimkou rezných rýchlostí. Tie nadobúdali hodnôt:  $260 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $310 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $360 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Kvôli vyťaženosti dielne ÚST-odboru obrábania bolo však sústruženie realizované v inej obrábacej dielni (dielňa spoločnosti UP-Steel, s.r.o.) a teda aj na inom stroji. Konkrétne išlo o CNC sústruh GU 600. Pri sústružení referenčného materiálu neboli merané dynamické účinky daného procesu ani parametre textúry povrchu. Z kruhovej tyče  $\phi 100 \text{ mm}$  bolo pripravených päť vzoriek o dĺžke  $250 \text{ mm}$  (viď príloha 4). Rovnako aj u tohto testu bolo súčasťou prípravy vzoriek odstránenie povrchovej kôry. Je nutné poznamenať, že charakter opotrebenia rezných hrán VRD pri obrábaní referenčného materiálu bol značne odlišný. Opotrebenie na chrpte bolo v priebehu trvanlivosti jednotlivých rezných hrán prakticky nemerateľné a ku zničeniu dochádzalo náhle, krehkým porušením v oblasti špičky. Tvar triesky mal podobný charakter ako u obrábania vzoriek z kobaltovej zliatiny. Ku koncu trvanlivosti rezných hrán sa lámavosť triesky rovnako zhoršila a začala vznikať trieska v tvare špirály. Zábery triesok sú rovnako súčasťou prílohy 4. Výsledná trvanlivosť u každej rezných rýchlosti bola stanovená prostredníctvom strednej hodnoty troch trvanlivostí rezných hrán VRD 1–3. V tabuľke 5.2 sú uvedené výsledné trvanlivosti pre jednotlivé rezné rýchlosti, získané z realizácie testu referenčného materiálu.

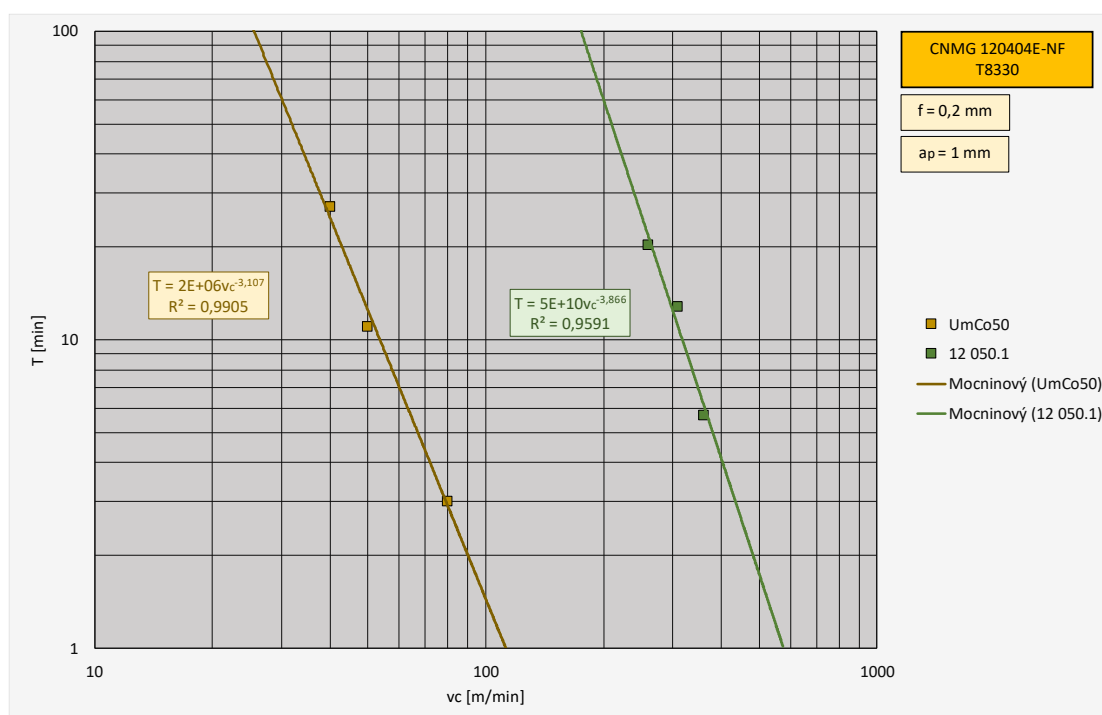
Tab. 5.1 Údaje k zostrojeniu T- $v_c$  pre testovaný materiál.

UmCo50	
$v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	T [min]
40	27,0
50	11,0
80	3,0

Tab. 5.2 Údaje k zostrojeniu T- $v_c$  pre referenčný materiál.

12 050.1	
$v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	T [min]
260	20,3
310	12,8
360	5,7

Vyššie uvedené údaje sú vstupom k zostrojeniu T- $v_c$  závislostí oboch materiálov, ktoré sú znázornené na obr. 5.11. Následne boli zistené konštanty  $C_T$ ,  $C_v$  a exponent  $m$ . K obom závislostiam sú tieto tri parametre uvedené v tabuľke 5.3.



Obr. 5.11 Taylorove závislosti pre testovaný a referenčný materiál.

Tab. 5.3 Hodnoty konštant  $C_T$ ,  $C_v$  a exponentu  $m$ .

UmCo50			12 050.1		
$C_T$ [-]	$C_v$ [-]	$m$ [-]	$C_T$ [-]	$C_v$ [-]	$m$ [-]
2363336	112,5	3,107	47116903858	576,7	3,866

Na základě získaných výsledků je možné tvrdit, že doporučená rezná rychlost k obrábění dané kombinace testovaný materiál-nástroj by se měla pohybovat na úrovni okolo  $50 \text{ m.min}^{-1}$  (pre bežnú trvanlivosť reznej hrany nástroja zo spekaného karbidu – 12 min). Test vyššej reznej rýchlosti ( $80 \text{ m.min}^{-1}$ ) preukázal výrazný pokles trvanlivosti reznej hrany a taktiež aj zvýšenú tendenciu k tvorbe nárazku.

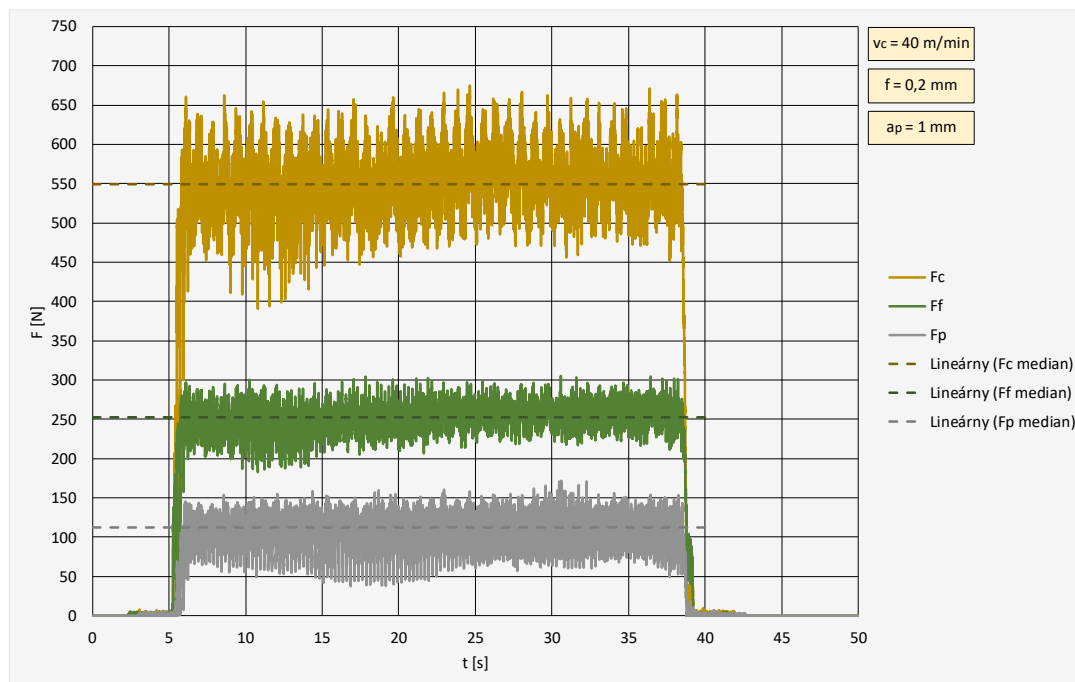
Vďaka realizácii experimentu so zvoleným referenčným materiálom je možné vyčíslit index obrobiteľnosti  $K_v$ , pomocou aplikovania vzťahu 1.1:

$$K_v = \frac{v_{c12(TM)}}{v_{c12(RM)}} = \frac{50,6 \text{ m.min}^{-1}}{303,2 \text{ m.min}^{-1}} = 0,167 [-].$$

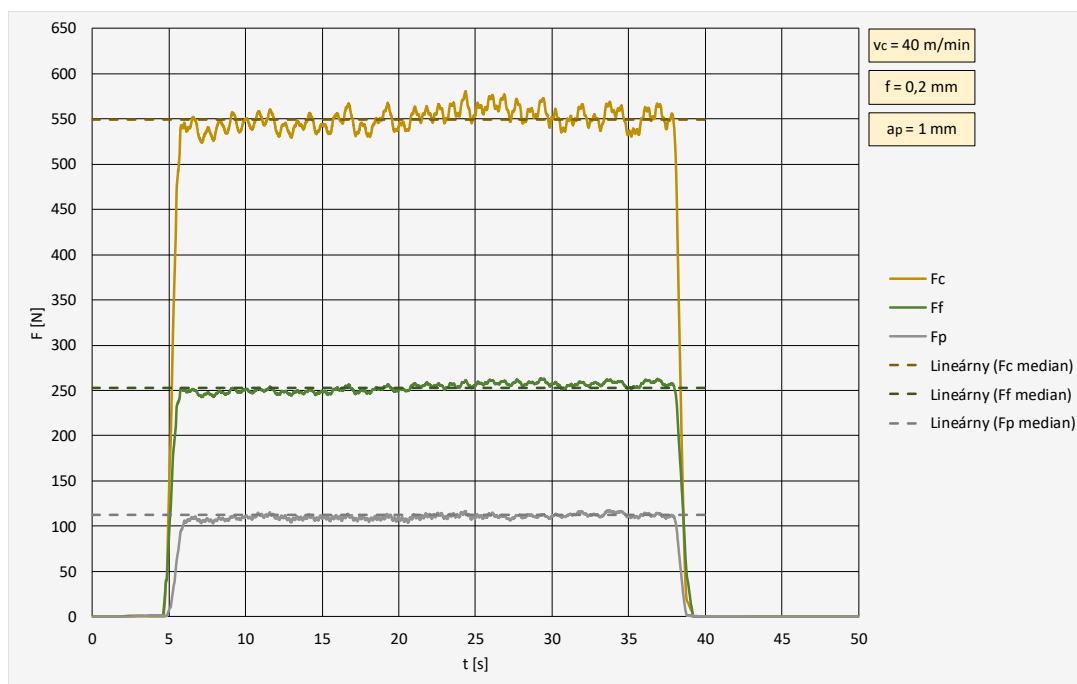
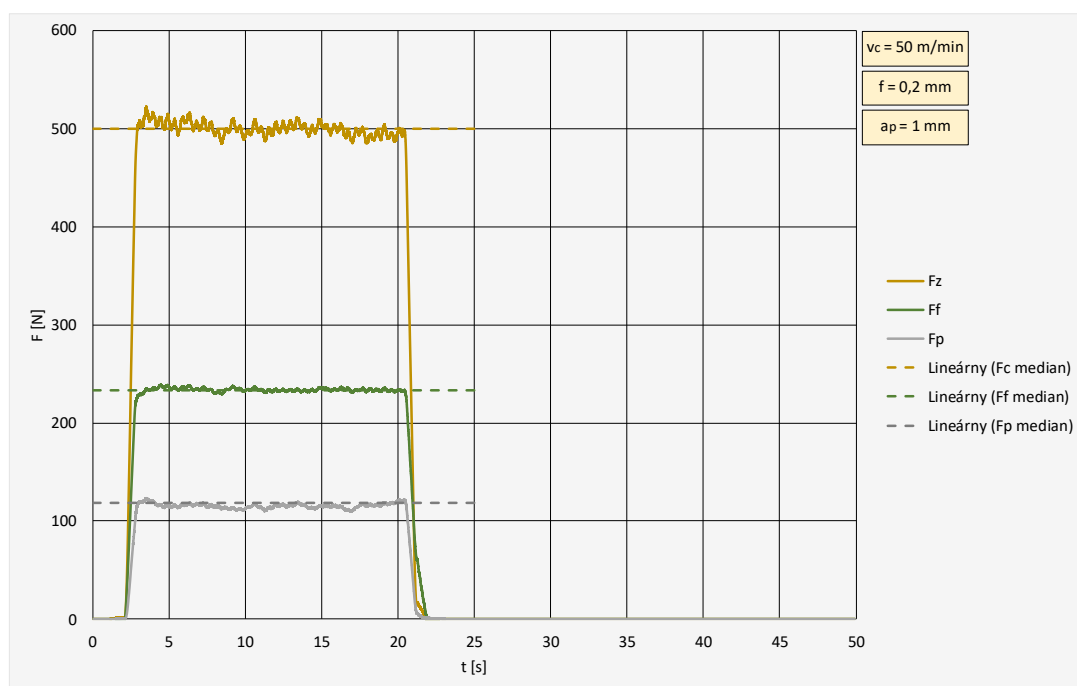
Pri zaradení testovaného materiálu do skupiny b – ocele, by mu na základe vypočítanej hodnoty indexu obrobiteľnosti, podľa tabuľky 1.1, bolo možné pridelit triedu obrobiteľnosti v rozsahu 6–7 b (platné pre zvolenú kombináciu materiál obrobku-nástroj).

## 5.2 Silové pôsobenie nástroja

Ako je uvedené v kapitole 4.4, počas realizácie experimentu s testovaným materiálom boli na dynamometri zaznamenávané silové účinky na nástroj pre vytipované prejazdy. Ukážku záznamov zo softvéru DynoWare je možné vidieť v prílohe 5. Po vytvorení záznamov v softvéri DynoWare sa údaje exportovali do textového súboru, z ktorého boli následne pri vyhodnocovaní nahrané do súboru s formátom .xlsx, kde sa spracovávali. Ukážku priebehu z prejazdu VRD 1-40  $\text{m.min}^{-1}$  je možno vidieť na obrázku 5.12. Na obrázku 5.13 je totožný priebeh, avšak je vyhladený. Voľba vyššej testovacej rýchlosti ( $50 \text{ m.min}^{-1}$ ) spôsobila mierny pokles reznej sily (vid' obr. 5.14). Priebeh zložiek rezných síl z testovanej rýchlosti  $80 \text{ m.min}^{-1}$  je obsahom prílohy 6. Poznámka: vo všetkých priebehoch rezných síl sú zložky vykreslené v absolútnych hodnotách.

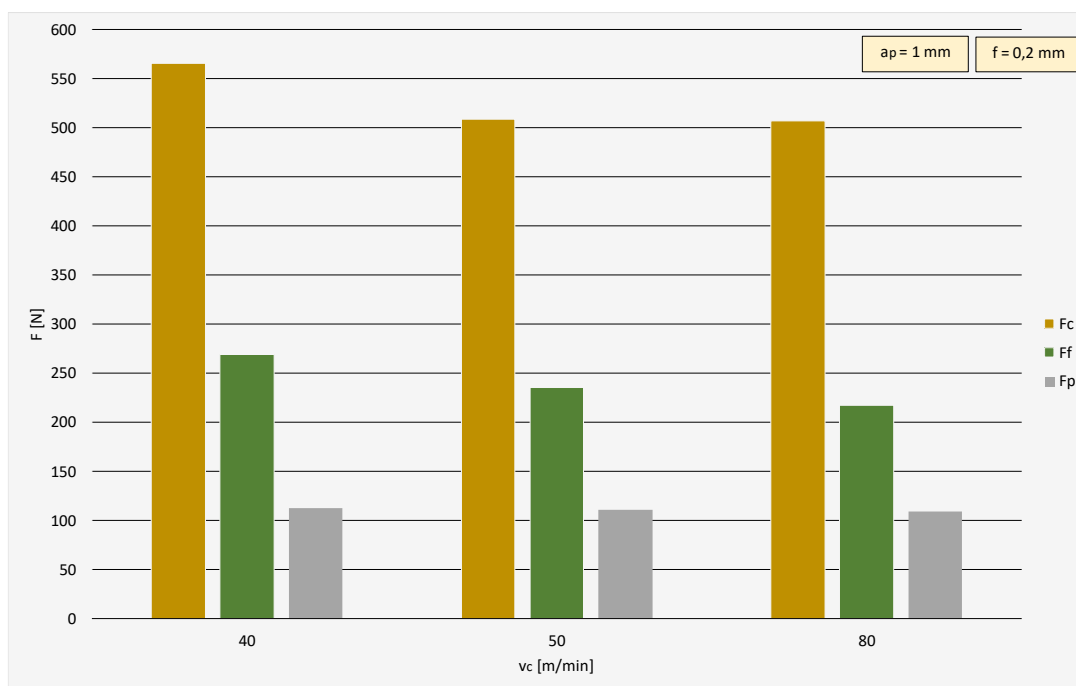


Obr. 5.12 Priebeh zložiek rezných síl v čase, ktorý bol vykreslený na základe dát z textového súboru ( $v_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$ , VRD 1, prvý prejazd – ostrá rezná hrana).

Obr. 5.13 Priebeh zložiek rezných síl v čase ( $v_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$ , VRD 1, prvý prejazd).Obr. 5.14 Priebeh zložiek rezných síl v čase ( $v_c = 50 \text{ m.min}^{-1}$ , VRD 1, prvý prejazd).

Silové pôsobenie na nástroj sa zaznamenávalo na začiatku testovania všetkých testovaných rýchlostí ( $40 \text{ m.min}^{-1}$ ,  $50 \text{ m.min}^{-1}$  a  $80 \text{ m.min}^{-1}$ ) – počas prvých prejazdov VRD 1 a VRD 2. Na základe vyhodnotenia týchto priebehov mohla byť vykreslená závislosť rezných síl na reznej rýchlosti (viď obr. 5.15).

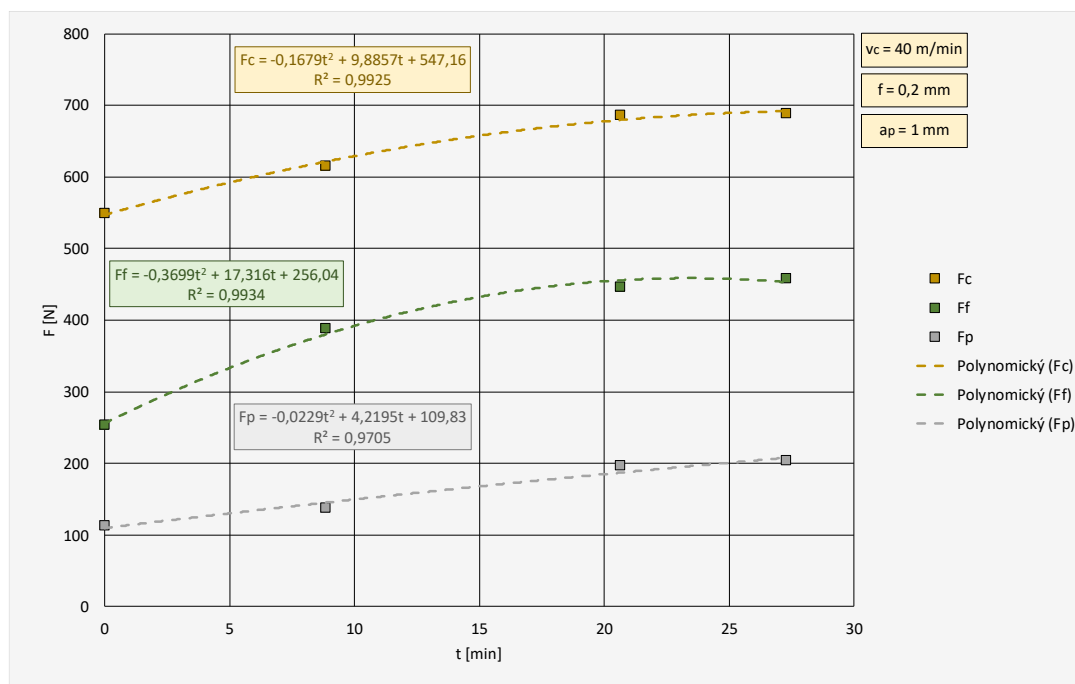
Pre vybranú reznú hranu (vždy na VRD 1) boli taktiež zaznamenávané rezné sily na konci jej trvanlivosti, ku zostrojeniu závislostí rezných síl na čase v zábere. U reznej rýchlosti  $40 \text{ m.min}^{-1}$  boli rezné sily zaznamenané aj po cca 9 min a 21 min v reze (viď obr. 5.16). Závislosti ku rýchlostiam  $50 \text{ m.min}^{-1}$  a  $80 \text{ m.min}^{-1}$  sú z rozsahových dôvodov umiestnené do prílohy 8.



Obr. 5.15 Závislosť veľkosti rezných síl na reznej rýchlosti.

Pomery jednotlivých zložiek rezných síl sú v súlade s očakávaním ( $F_c > F_f > F_p$ ), vzhľadom na to, že sa jedná o pozdĺžne sústruženie vonkajšej valcovej plochy. Teoretický výpočet zložiek rezných síl by síce bol realizovateľný, avšak výsledky by sa pravdepodobne značne líšili od nameraných hodnôt, vzhľadom k obmedzeným poznatkom o testovanom materiáli, z dostupnej literatúry. Zo závislosti na obr. 5.9 možno vyvodit' záver, že najvyššie hodnoty jednotlivých zložiek rezných síl sa vyskytovali pri obrábaní rýchlosťou  $40 \text{ m.min}^{-1}$  ( $F_c = 565 \text{ N}$ ,  $F_f = 268 \text{ N}$  a  $F_p = 112 \text{ N}$ ). Prechod ku vyšším rýchlostiam znamenal pokles tangenciálnej zložky reznej sily o 10 %, na hodnotu okolo 500 N. Takisto došlo k poklesu zložky v smere posuvovej rýchlosti. Na veľkosť pasívnej zložky reznej sily zmena reznej rýchlosti nemala zásadnejší vplyv.

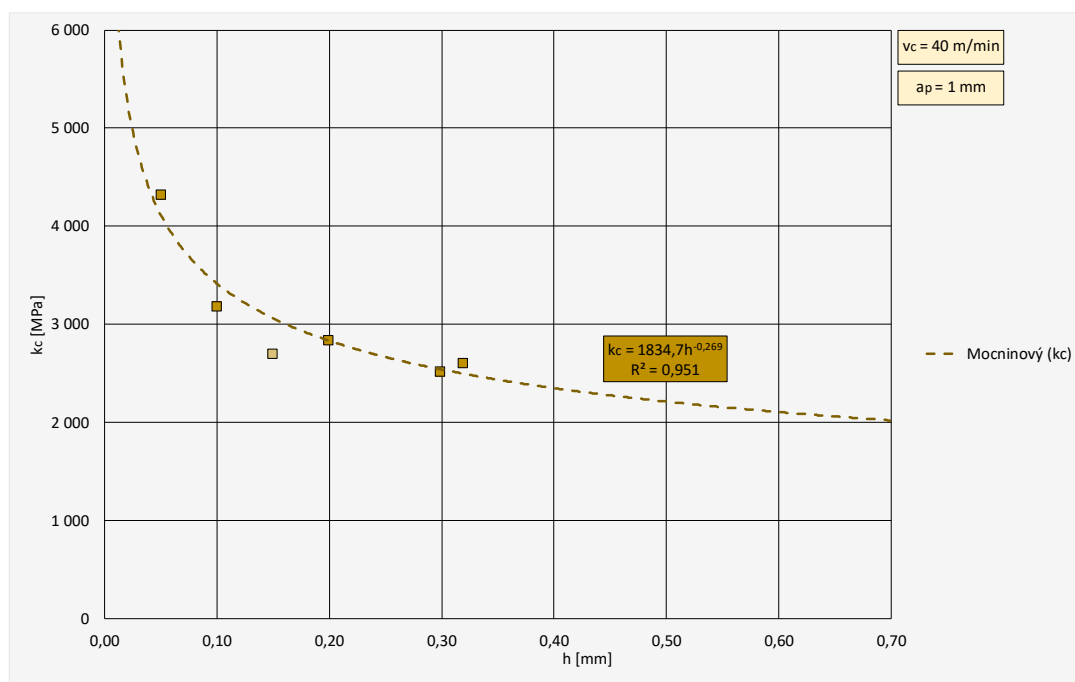
Zo závislostí rezných síl na čase reznej hrany v reze možno vyčítať, že opotrebenie sa výrazne premietlo do silového pôsobenia na nástroj. Najvýraznejší nárast bol zaznamenaný u testovanej rýchlosti  $80 \text{ m.min}^{-1}$ , kde došlo k abnormálnemu nárastu zložiek  $F_f$  a  $F_p$ . Pri nižších rezných rýchlostiach sa preukázali menšie rozdiely. Najväčší nárast sa vyskytoval u posuvovej zložky  $F_f$ . U  $v_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$  došlo k nárastu tejto zložky o cca 81 %, pre  $50 \text{ m.min}^{-1}$  to bolo až o 118 %. Aj po prekonaní kritickej miery opotrebenia boli však u dvoch nižších rýchlostí dominantné tangenciálne zložky síl. Zaujímavosťou je pokles  $F_p$  u  $v_c = 50 \text{ m.min}^{-1}$  (viac viď príloha 7).



Obr. 5.16 Závislost' veľkosti zložiek rezných síl na čase reznej hrany v reze (VRD 1).

### 5.2.1 Merná rezná sila

Ďalším zámerom bolo pomocou realizácie zmeny posuvu zostrojiť pre testovaný materiál závislosť mernej reznej sily na hrúbke triesky. Zvolili sa nasledovné hodnoty posuvov: 0,05 mm, 0,1 mm, 0,15 mm, 0,2 mm, 0,3 mm a 0,32 mm. Rezná rýchlosť bola počas tohto experimentu konštantná, na úrovni 40 m.min<sup>-1</sup>. Zo zvolených parametrov obrábacieho procesu ( $a_p$  a  $f$ ) sa stanovili prierezy triesok, na ktorých pôsobila dynamometrom zmeraná, tangenciálna zložka reznej sily. Podielom jednotlivých síl a prierezov triesky sa spočítali hodnoty  $k_c$ . Body boli vynesené do grafu (obr. 5.17) a preložené mocninovou funkciou.



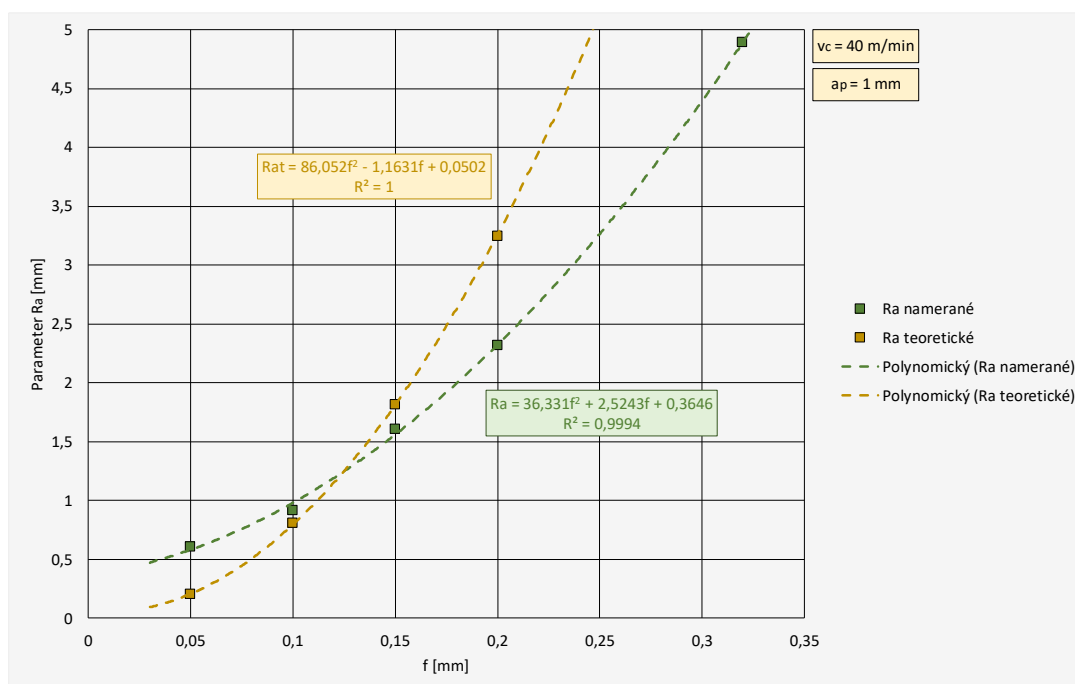
Obr. 5.17 Závislosť mernej reznej sily na hrúbke triesky.



V závislosti si možno všimnúť bod s menej výrazným zafarbením ( $h = 0,149$  mm). Tento bod bol pri zostrojovaní závislosti vynechaný. Pravdepodobne išlo o chybu merania. Naopak, bod  $h = 0,199$  mm má najvyššiu výpovednú hodnotu, pretože bola vynesená stredná hodnota z 3 meraní. Všetky ostatné hodnoty  $k_c$  boli spočítané pomocou sily, ktorá bola zistená iba počas jedného merania (1 prejazd v dĺžke 25 mm). Vzhľadom na pomerne malý počet meraní je túto závislosť potrebné brať iba ako predbežnú. Podrobnejšie meranie by mohlo priniesť mierene odlišné výsledky. Skúmanie mernej reznej sily testovaného materiálu nebolo primárnym cieľom tejto práce, avšak mohlo by byť námetom pre budúce práce.

### 5.3 Meranie parametru Ra

Po zmeraní síl ku vyhodnoteniu grafu mernej reznej sily boli zmerané aj parametre Ra vytvorených plôch. Na každej ploche sa meranie realizovalo trikrát a s pootočením obrobku okolo osi rotácie. Pri spracovaní bola z týchto údajov zistená stredná hodnota a následne vynesená do závislosti parametru Ra na veľkosti posuvu. Závislosť možno vidieť na obrázku 5.18. Rozdiely v kvalite jednotlivých plôch boli možné vidieť na prvý pohľad, ako je možné vidieť aj na obrázku 5.19.



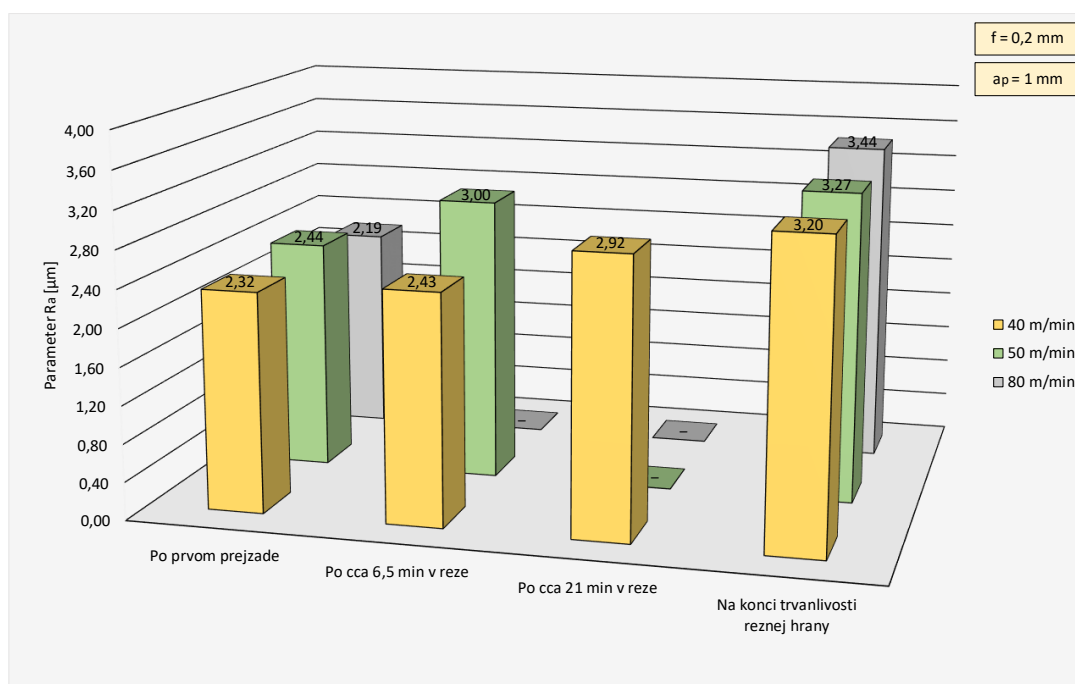
Obr. 5.18 Závislosť parametru Ra na veľkosti posuvu.

Závislosť bola doplnená aj o teoretické hodnoty parametru Ra, stanovené výpočtom. Obe závislosti sa najviac zhodujú v oblasti posuvu 0,1–0,15 mm. Je nutné poznamenať, že vzťah pre výpočet teoretickej hodnoty Ra vychádza len z polomeru špičky nástroja a hodnoty posuvu. Ostatné vplyvy, ako napríklad vlastnosti obrábaného materiálu do úvahy neberie. To môže byť príčinou značného rozdielu v oblasti 0,2–0,3 mm. Predpoklady, v podobe zhoršujúcej sa kvality povrchu so stúpajúcou hodnotou posuvu sa naplnili. Hodnoty  $Ra = 0,8–3,2$   $\mu\text{m}$  sú u sústruženia považované za štandardné a boli dosiahnuté práve v oblasti odporúčaných rezných podmienok od výrobcu. Vysoká hodnota Ra po sústružení s posuvom 0,3 mm mohla teda súvisieť s nevhodnou voľbou rezných podmienok.



Obr. 5.19 Rozdiel v kvalite obrobených plôch, na základe zmeny hodnoty posuvu (nižšie –  $f = 0,05$  mm, vyššie –  $f = 0,2$  mm) .

Priemerná aritmetická odchýlka profilu bola taktiež kontrolovaná počas testu trvanlivosti VRD. Aj tu sa meranie realizovalo rovnakou metodikou ako u predchádzajúcej závislosti. V tomto prípade sa však údaje zaznamenávali vždy na dvoch plochách, ktoré boli vytvorené dvoma rôznymi testovacími VRD (1 hodnota v grafe bola vyhodnotená zo 6 nameraných hodnôt). Obrázok 5.20 vyjadruje závislosť parametru Ra na čase rezných hrán v reze, pre jednotlivé testované rýchlosti. Celkovo možno pozorovať rastúci trend parametru Ra, so stúpajúcim časom reznej hrany v zábere, čoho príčinou je najmä jej opotrebenie. Ukázalo sa, že po dosiahnutí kritického opotrebenia rezných hrán boli parametre Ra podobné u všetkých testovaných rýchlostí. Je potrebné však mať na zreteli rozdielne hodnoty trvanlivostí. Zlepšenie kvality povrchu by sa dalo doceliť napríklad voľbou väčšieho polomeru špičky VRD.



Obr. 5.20 Veľkosť parametru Ra, v závislosti od reznej rýchlosti a času rezných hrán v zábere.

## 6 DISKUSIA

Na základe poznatkov z realizovania a vyhodnotenia experimentu možno uviesť niekoľko postrehov.

Rezná rýchlosť  $40 \text{ m.min}^{-1}$  bola navrhnutá podľa katalógu výrobcu zvoleného rezného nástroja [10]. Na základe zvolenej triedy (T8330) a rezných podmienok ( $a_p$  a  $f$ ) bola určená tzv. štartovacia rezná rýchlosť, ktorá bola ešte pomocou niekoľkých opravných súčiniteľov skorigovaná. Očakávaná trvanlivosť rezných hrán mala byť na úrovni približne 10 min. Experiment však ukázal, že rezné hrany až na dvoch VRD dosiahli trvanlivosti približne 27 min. Následne bolo rozhodnuté, že ďalšie testovacie, rezné rýchlosti musia byť od tejto hodnoty vyššie, aby sa rezné hrany opotrebovali rýchlejšie a tak mohlo byť vykreslených čo najviac bodov do závislosti  $T-v_c$ . Nakoniec sa podarilo namerať údaje ku vyneseniu troch bodov do  $T-v_c$  závislosti, a to ako pre testovaný materiál, tak aj pre referenčný materiál. Ďalšie body nemohli byť zostrojené z dôvodu obmedzeného množstva testovacieho materiálu. Voľba vyšších, testovacích, rezných rýchlostí (napr. v poradí:  $60 \text{ m.min}^{-1}$ ,  $67 \text{ m.min}^{-1}$ ,  $75 \text{ m.min}^{-1}$  a  $84 \text{ m.min}^{-1}$ ) by pravdepodobne umožnila o čosi kvalitnejšie zostrojenie Taylorovej závislosti.

Jednalo sa o pomerne časovo náročnú úlohu. Po vyhodnotení kriviek  $VB_B = \text{funkcia}(t)$  možno tvrdiť, že počet meraní bol pomerne veľký, a to najmä u testovanej rýchlosti  $40 \text{ m.min}^{-1}$ . U tejto rýchlosti by bol dostatočný aj polovičný počet meraných bodov. Bolo však náročné pred experimentom predikovať, aký by mal byť primeraný časový úsek medzi meraniami parametru  $VB_B$ , vzhľadom ku chýbajúcim poznatkom k obrábaniu kobaltovej zliatiny UmCo50.

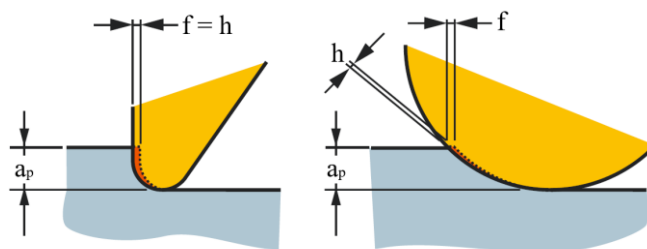
Použitie stolného skeneru LiDE 400 ku vyhodnocovaniu opotrebenia na chrchte malo svoje klady aj zápory. Na skenovacím stole bol vytvorený jednoduchý prípravok, pre zabezpečenie stálej polohy VRD počas skenovania. Pri realizovaní samotného experimentu sa vykonávalo skenovanie VRD a ukladanie dát do notebooku. Vyhodnotenie jednotlivých snímkov nebolo uskutočňované priamo v dielni ale až dodatočne, po skončení obrábania. Výhodou tohto spôsobu vyhodnocovania bolo kľudnejšie prostredie a možnosť zopakovania jednotlivých meraní, čo minimalizovalo hrubé chyby merania. Na druhú stranu je však nutné povedať, že kvalita snímkov nebola príliš vysoká. Avšak vzhľadom na to, že povrch doštičky bol opatrený žltým TiN povlakom, opotrebenie sa dalo pomerne dobre rozoznať. Otázkou však zostáva, ako by to bolo v prípade iného druhu povlaku. Voľba profesionálneho meracieho zariadenia by pravdepodobne tvorila vhodnejšiu alternatívu a znížila by systematickú chybu merania. Nesporné výhody skenera sú však v jeho flexibilita a pomerne nízkej obstarávacej cene, oproti profesionálnemu prístroju.

Počas realizácie experimentu došlo aj k niekoľkým drobným chybám. Hneď na začiatku konania experimentu došlo ku chybe, kedy sa zistilo, že vplyvom nepozornosti obsluhy stroja boli nastavené nesprávne rezné podmienky ( $f = 0,28 \text{ mm}$ ). Došlo k náprave a neskôr sa zistilo, že táto chyba bola dokonca prínosná. Zaznamenaná trvanlivosť reznej hrany, za uvedeného posuvu,  $v_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$  a  $a_p = 1 \text{ mm}$ , sa pohybovala na úrovni okolo 3 min. Otupenie reznej hrany v tomto prípade nastávalo prevažne krehkým porušením. Zistená trvanlivosť rezných hrán za rovnakých podmienok, ale pri posuve  $f = 0,2 \text{ mm}$  činila 27 min, čo je výrazný rozdiel. Príčinu tohto javu treba hľadať v odporúčaných rezných podmienkach k zvolenej VRD (viď podkapitola 4.2). Výborná húževnatosť testovanej zliatiny sa prejavila vo forme nárastu silového namáhania reznej hrany, čo spôsobilo dramatický pokles jej trvanlivosti. Za ďalšiu chybu pri meraní by sa dalo zaradiť mierne kolísanie otáčok vretena, vplyvom jeho zbrzdzenia od účinkov obrábacieho procesu.

Zo zostrojenej závislosti mernej reznej sily na hrúbke triesky možno vyvodit' záver, že hodnota  $k_{c1}$  pre testovaný materiál by sa mala pohybovať na úrovni okolo 1835 MPa. Očakávaná hodnota  $k_{c1}$  bola však vyššia (2500–3000 MPa). Je potrebné však mať na zreteli stav materiálu pri obrábaní – stav po odliatí. Mechanické vlastnosti tejto kobaltovej zliatiny a taktiež zmerané hodnoty tvrdosti ukazujú, že nepatrí medzi zliatiny práve s najlepšimi mechanickými vlastnosťami (vzhľadom aj na absenciu tepelného spracovania). Prednosťami tohto materiálu sú predovšetkým odolnosť voči tepelným šokom, oteru, prípadne húževnatosť.

### 6.1 Návrh pre ďalšie skúmanie

K obrábaniu kobaltových zliatin literatúra [35] odporúča redukciu uhla  $K_r$ , čím sa dosiahne redukcia hrúbky triesky a zmiernenie vrubového opotrebenia na chrchte. V prípade  $K_r = 90^\circ$ , je hrúbka triesky totožná s hodnotou posuvu. Redukcia uhla  $K_r$  sa dá veľmi efektívne zrealizovať pomocou voľby kruhového tvaru VRD (viď obrázok 6.1).



Obr. 6.1 Redukcia uhla  $K_r$  pomocou zmeny tvaru VRD [35].

Dôjde tak k redukcii hodnoty  $a_p$  pod hodnotu polomeru špičky  $r_e$ . Zároveň sa však aj zmenší uhol  $K_r$ . Dochádza tak ku zvýšeniu efektívnej dĺžky reznej hrany. Prínos tohto úkonu by sa mal prejavovať v znížení teploty pri obrábaní a náraste produktivity. Nevýhodou je však generovanie väčšej pasívnej sily.

Námetom k ďalšiemu skúmaniu by teda mohlo byť napríklad porovnanie rôznych aspektov pri obrábaní superzliatin kruhovým tvarom doštičky s iným tvarom (napr. tvar C alebo D). Veľmi prínosné by boli taktiež poznatky o danom materiáli z hľadiska zostatkovej napätosti v obrobennej vrstve.

Rovnako by bolo zaujímavé sledovať ako sa zmenia sledované veličiny u obrábania s použitím procesných kvapalín. Ich použitie by bolo pravdepodobne prospešné, avšak výrobca zvoleného rezného nástroja udáva, že ich použitie má iba mierne pozitívny efekt na trvanlivosť. Vzhľadom aj na obmedzené množstvo testovacieho materiálu, nebolo prívelmi žiadúce predlžovanie životnosti rezných hrán. Novodobé trendy v oblasti obrábania HRSA zliatin (ale aj iných materiálov) smerujú ku vysokotlakovému chladeniu, príp. kryogénnemu obrábaniu. Zavedenie takýchto procesov má nesporné výhody, avšak znamenajú značnú finančnú záťaž a je potrebné zvážiť, či sa ich použitie oplatí.

## ZÁVER

Náplňou tejto diplomovej práce bolo priblížiť zvolený testovací materiál, vo forme zliatiny na báze kobaltu UmCo50, z rôznych hľadísk obrábacieho procesu – sústruženia. Nadobudnuté poznatky z realizácie a následného vyhodnotenia experimentálnej časti možno zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- odporúčaná rezná rýchlosť k sústruženiu zliatiny UmCo50, za zvolených rezných podmienok ( $a_p = 1 \text{ mm}$ ,  $f = 0,2 \text{ mm}$ ), sa na základe zostrojenej  $T-v_c$  závislosti javí  $v_c = 50 \text{ m.min}^{-1}$  (pre bežnú trvanlivosť reznej hrany nástroja zo spekaného karbidu – 12 min),
- v prospech  $v_c = 50 \text{ m.min}^{-1}$  svedčia aj zistené hodnoty rezných síl pri obrábaní ostrou reznou hranou,
- meranie silového pôsobenia otupených rezných hrán potvrdilo predpokladaný nárast zložiek rezných síl a parametru  $R_a$ , najväčšie zvýšenia boli zaznamenané v prípade testovanej rýchlosti  $80 \text{ m.min}^{-1}$ , kedy dochádzalo ku zničeniam rezných hrán náhle a vplyvom krehkého porušenia v oblasti polomeru špičky,
- u sústruženia ostrými reznými hranami nebol zaznamenaný zásadnejší vplyv reznej rýchlosti na parameter  $R_a$  a jeho hodnoty sa pohybovali na úrovni  $R_a = 2,3 \text{ }\mu\text{m}$ ,
- redukciou posuvu na hodnotu  $f = 0,05 \text{ mm}$  ( $v_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$ ) bolo dosiahnuté zlepšenie kvality obrobenej plochy, kedy parameter  $R_a$  klesol na hodnotu  $R_a = 0,6 \text{ }\mu\text{m}$ ,
- zistená hodnota  $k_{c1} = 1835 \text{ MPa}$  bola nižšia v porovnaní s očakávanou hodnotou, je však potrebné prihliadnuť na mechanické vlastnosti testovanej zliatiny a jej stav pri obrábaní (absencia tepelného spracovania),
- pri realizácii experimentu sa viackrát ukázalo, že použitie vyšších hodnôt posuvu ( $f = 0,28 \text{ mm}$  alebo  $f = 0,3 \text{ mm}$ ) je nevhodné a spôsobuje výrazný pokles trvanlivosti reznej hrany, či zvýšenie parametru  $R_a$ ,
- na základe realizácie experimentu s referenčným materiálom (ocel 12 050.1) bola pre trvanlivosť reznej hrany 12 min zistená hodnota reznej rýchlosti:  $v_c = 303 \text{ m.min}^{-1}$ ,
- v prípade zaradenia testovaného materiálu do skupiny b – ocele, by mu bolo možné na základe vypočítaného indexu obrobiteľnosti  $K_v = 0,167$ , pre zvolenú kombináciu materiál obrobku–nástroj, prideliť triedu obrobiteľnosti v rozsahu 6–7 b.



## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [2] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění [online]*. Ostrava, 2011 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: [http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni\\_metody\\_%20v\\_obrabe\\_ni.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrabe_ni.pdf). Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [3] Global Machining Aluminum Market 2020 Analysis *Trend, Applications, Industry Chain* Structure, Growth, and Forecast to 2025. In: Bcfocus.com [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://bcfocus.com/global-machining-aluminum-market-2020-analysis-trend-applications-industry-chain-structure-growth-and-forecast-to-2025/>
- [4] Embracing and Benefitting from Hard Milling. In: *Metalformingmagazine.com [online]*. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://www.metalformingmagazine.com/article/?/tooling/tool-build-and-maintenance/embracing-and-benefitting-from-hard-milling>
- [5] LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 3., dopl. vyd., dot. Praha: Scientia, 1999. ISBN isbn80-7183-164-6.
- [6] BARÁNEK, Ivan. REZNÉ MATERIÁLY PRE HSC [online]. Trnava, 2007 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: [https://www.mtf.stuba.sk/buxus/docs/doc/veda\\_a\\_vyskum/monografie/VM\\_Barane\\_k.pdf](https://www.mtf.stuba.sk/buxus/docs/doc/veda_a_vyskum/monografie/VM_Barane_k.pdf). Vedecká monografia. SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE.
- [7] HUMÁR, Anton. TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část [online]. Brno, 2003 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf). Studijní opory pro magisterskou formu studia. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [8] KROČKO, Vladimír. Rezné materiály a prostredie. *Teplota a teplota pri obrábaní*. Obrábatelnosť materiálov .: Obrábanie a metrológia. In: Ingslov.files.wordpress.com [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://ingslov.files.wordpress.com/2015/05/04-rezne-materialy-a-prostredie.pdf>
- [9] WIT, Grzesik. *Machinability of Engineering Materials. Advanced Machining Processes of Metallic Materials - Theory, Modelling and Applications*. Elsevier, 2008, s. 1-1. ISBN 9780080445342. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpAMPMMTM1/id:kt009Y84Y6/advanced-machining-processes/machinability-engineering?kpromoter=Summon>
- [10] DORMER PRAMET KATALÓG 2019: Sústruženie. In: *Mav.cz [online]*. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: [https://www.mav.cz/data/katalog/ostatni/PRAMET\\_2019.pdf](https://www.mav.cz/data/katalog/ostatni/PRAMET_2019.pdf)
- [11] Soustružnická příručka SANDVIK Coromat: Všeobecné soustružení - *Upichování a zapichování - Řezání závitů*. In: Kvantum.sk [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: [https://www.kvantum.sk/files/turning\\_handbook\\_cs.pdf](https://www.kvantum.sk/files/turning_handbook_cs.pdf)
- [12] BUMBÁLEK, Bohumil. INTEGRITA POVRCHU A JEJÍ VÝZNAM PRO POSOUZENÍ VHODNOSTI DANÉ PLOCHY PRO JEJÍ FUNKCI [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: [http://gps.fme.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2512\\_Bumbalek.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf)
- [13] The Essential Features of Metal Cutting. *Metal Cutting. 4th Edition*. Elsevier,



- 2000, s. 21-55. ISBN 9780750670692. Dostupné také z:  
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpMCE00012/id:kt00BJOYV2/metal-cutting-4th-edition/essential-features-metal?kpromoter=Summon>
- [14] Specific cutting force. In: Sandvik.coromant.com [online]. Sandvik Coromant [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/specific-cutting-force.aspx>
- [15] STÅHL, Jan-Eric. SECO TOOLS. *Metal cutting: theories and models*. Lund: Division of Production and Materials Engineering, Lund University, 2012, iii, 580 stran : barevné ilustrace. ISBN 978-91-637-1336-1.
- [16] Příručka pro technology - Není teplota příliš vysoká nebo nízká?. In: Mmspektrum.com [online]. [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-neni-teplota-prilis-vysoka-nebo-nizka.html>
- [17] Obráběné materiály. In: Sandvik.coromant.com [online]. Sandvik Coromant [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>
- [18] DIN EN 1.4301 Stainless Steel X5CrNi18-10 Material Equivalent, Properties, Chemical Composition. In: Theworldmaterial.com [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.theworldmaterial.com/din-en-1-4301-material-x5crni18-10-stainless-steel/>
- [19] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2., opr. a rozš. vyd.* Brno: CERM, 1999, 392 s. : il. ; 25 cm. ISBN 80-7204-130-4.
- [20] KLAČURKOVÁ, Lenka. Atlas materiálových struktur (*multimediální atlas materiálů*). In: <http://ime.fme.vutbr.cz> [online]. Brno [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/ke-stazeni>
- [21] WOJTASZEK, Marek, Tomasz ŚLEBODA, Maciej RUMIŃSKI a Janusz ŁUKSZA. Design and Verification of the Parameters of Hot Forging of Ti10V2Fe3Al Alloy Compacts. In: *Applied Mechanics and Materials* [online]. s. 119-123 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.606.119
- [22] AB SANDVIK COROMANT. Application Guide Titanium [online]. Sandviken, Sweden, 2011 [cit. 2021-03-10]. C-2920:35-ENG/01. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/en-gb/c-2920-35.pdf>
- [23] Grade 23 Ti 6Al 4V ELI Alloy (UNS R56401). In: Azom.com [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9365>
- [24] MILLS, B. a A. H. REDFORD. *Machinability of Engineering Materials*. Springer Netherlands, 1983. ISBN 978-94-009-6631-4.
- [25] DAVIS, J. R. (Joseph R.). *ASM speciality handbook: Nickel, cobalt, and their alloys*. Materials Park: ASM International, 2000, 442 s. : il. ; 29 cm. ISBN 978-0-87170-685-0.
- [26] CROOK, P. a W. L. SILENCE. *55 Cobalt Alloys*. REVIE, R. Winston. Uhlig's Corrosion Handbook [online]. 3rd Edition. 2011, s. 747-756 [cit. 2021-03-24]. ISBN 978-0-470-08032-0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpUCHE0013/uhlig-s-corrosion-handbook/uhlig-s-corrosion-handbook>
- [27] MAJCHŘÁK, Aleš. *Výroba a vlastnosti žáruvzdorných slitin*. Brno, 2020.

- Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124249>.  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.
- [28] SOUSTRUŽENÍ: Katalog a technický průvodce. In: *Secotools.com [online]*. SECO TOOLS AB, 2020 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/84585>
- [29] NOVÉ SOUSTRUŽNICKÉ MATERIÁLY. In: *Mav.cz [online]*. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <http://katalog.mav.cz/data/upload/files/33854-nove-materialy-rady-t8300.pdf>
- [30] SOUSTRUŽNICKÉ UTVAŘEČE. In: *Dormerpramet.com: Upínací systémy ISO P, D, M, S [online]*. DORMER PRAMET [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: [https://www.dormerpramet.com/downloads/soustru%c5%benick%c3%a9%20utva%c5%99e%c4%8de\\_sk.pdf](https://www.dormerpramet.com/downloads/soustru%c5%benick%c3%a9%20utva%c5%99e%c4%8de_sk.pdf)
- [31] ISO 3685. Tool-life testing with single-point *turning tools*. *Second edition*. 1993.
- [32] SPALOVACÍ ANALYZÁTOR G4 ICARUS SERIES 2 - *PRO ANALÝZY UHLÍK SÍRA*. In: *Spektrometry.cz [online]*. [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: [https://www.spektrometry.cz/analyzatory/spalovaci\\_analyzator\\_c\\_s\\_g4\\_icarus\\_hf\\_typ\\_c.php](https://www.spektrometry.cz/analyzatory/spalovaci_analyzator_c_s_g4_icarus_hf_typ_c.php)
- [33] UMCo50. In: *Hitachi-metals.co.jp [online]*. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://www.hitachi-metals.co.jp/e/products/infr/ai/umco50.html>
- [34] RUČNÍ RENTGENOVÝ ANALYZÁTOR ALPHATM: Provedení pro kovy a slitiny. In: *Spektrometry.cz [online]*. [cit. 2021-05-17].
- [35] Heat resistant super alloys: Application guide. In: *Manualsdir.com [online]*. Sandvik Coromant AB, 2010 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.manualsdir.com/manuals/407504/sandvik-coromant-heat-resistant-super-alloys.html?page=58&original=1>

## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratka	Popis
BCC	Kubická priestorovo centrovaná mriežka
CT	Priemerná teplota (Composite temperature)
CVD	Povlakovanie chemickou metódou (Chemical vapour deposition)
FCC	Kubická plošne centrovaná mriežka
HAZ	Teplom ovplyvnená zóna reznej hrany (Heat affected zone)
HB	Tvrdosť podľa Brinella
HCP	Hexagonálna mriežka
HEA	Vysoko entropické zliatiny (High entropy alloys)
HRA	Tvrdosť podľa Rockwella
HRC	Tvrdosť podľa Rockwella
HRSA	(High resist super alloys)
HSC	Vysokorýchlostné obrábanie (High speed cutting)
HSS	Rýchlorezná oceľ (High speed steel)
PD	Polykryštalický diamant
PKNB	Polykryštalický nitrid bóru
PTP	Geometrický bod na reznej hrane s najväčšou teplotou (Peak temperature point)
PVD	Povlakovanie fyzikálnou metódou (Physical Vapour Deposition)
ÚST	Ústav strojárkej technológie
VRD	Vymeniteľná rezná doštička
VRD 1–3	Testovacia vymeniteľná rezná doštička č.1–3

Symbol	Jednotka	Popis
$A_5$	[%]	Ťažnosť
$A_D$	[mm <sup>2</sup> ]	Prierez triesky
$C_{Fc}$	[-]	Materiálová konštanta
$C_{Ff}$	[-]	Materiálová konštanta
$C_{Fp}$	[-]	Materiálová konštanta
$C_T$	[-]	Konštanta v Taylorovej závislosti (Teoretická trvanlivosť pri reznú rýchlosť $v_c = 1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ )
$C_v$	[-]	Konštanta v Taylorovej závislosti (Teoretická rezná rýchlosť pre trvanlivosť $T = 1 \text{ min}$ )
$F$	[N]	Celková rezná sila
$F_c$	[N]	Tangenciálna zložka reznej sily
$F_f$	[N]	Zložka reznej sily v smere posuvovej rýchlosti
$F_p$	[N]	Pasívna zložka reznej sily

$F_x$	[N]	Meraná zložka reznej sily
$F_y$	[N]	Meraná zložka rezného odporu
$F_z$	[N]	meraná zložka rezného odporu
$K_{Fc}$	[-]	Koeficient (napr. vplyvu kôry, prerušovaného rezu apod.) pre výpočet reznej sily
$KT$	[mm]	Hĺbka žliabku na čele
$K_v$	[-]	Index obrobiteľnosti
$R_a$	[ $\mu$ m]	Priemerná aritmetická odchýlka posudzovaného povrchu
$R_m$	[MPa]	Medza pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	Medza klzu
$R_z$	[ $\mu$ m]	Najväčšia výška profilu drsnosti
$T$	[min]	Trvanlivosť reznej hrany
$T_i$	[min]	Trvanlivosť v bode i
$T_{vc40}$	[min]	Výsledná trvanlivosť, ktorá bola vynesená do Taylorovej závislosti pre reznú rýchlosť $v_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$
$T_{vc50}$	[min]	Výsledná trvanlivosť, ktorá bola vynesená do Taylorovej závislosti pre reznú rýchlosť $v_c = 50 \text{ m.min}^{-1}$
$T_{vc80}$	[min]	Výsledná trvanlivosť, ktorá bola vynesená do Taylorovej závislosti pre reznú rýchlosť $v_c = 80 \text{ m.min}^{-1}$
$VB$	[mm]	Šírka fazetky opotrebenia na chrbte rezného nástroja
$VB_B$	[mm]	Šírka fazetky opotrebenia na chrbte rezného nástroja, meraná v oblasti B
$a_p$	[mm]	Šírka záberu hlavného ostria
$f$	[mm]	Posuv na otáčku
$h$	[mm]	Hrúbka triesky
$i$	[-]	Poradie jednotlivého bodu
$k_c$	[MPa]	Merná rezná sila
$k_{c1}$	[MPa]	Merná rezná sila pre prierez triesky $1 \text{ mm}^2$
$m$	[-]	Exponent v Taylorovom vzťahu
$mc$	[-]	Exponent pre výpočet mernej reznej sily
$n$	[-]	Počet (napr. bodov Taylorovej závislosti)
$v_c$	[ $\text{m.min}^{-1}$ ]	Rezná rýchlosť pri obrábaní
$v_{ci}$	[ $\text{m.min}^{-1}$ ]	Rezná rýchlosť v bode i
$v_{cT}$	[ $\text{m.min}^{-1}$ ]	Rezná rýchlosť pre hodnotu konkrétnej trvanlivosti
$v_{cT(RM)}$	[ $\text{m.min}^{-1}$ ]	Rezná rýchlosť pre hodnotu konkrétnej trvanlivosti (pre referenčný materiál)
$v_{cT(TM)}$	[ $\text{m.min}^{-1}$ ]	Rezná rýchlosť pre hodnotu konkrétnej trvanlivosti (pre testovaný materiál)
$v_{c12}$	[ $\text{m.min}^{-1}$ ]	Rezná rýchlosť pre trvanlivosť 12 min
$v_{c12(RM)}$	[ $\text{m.min}^{-1}$ ]	Rezná rýchlosť pre trvanlivosť 12 min (pre referenčný materiál)
$v_{c12(TM)}$	[ $\text{m.min}^{-1}$ ]	Rezná rýchlosť pre trvanlivosť 12 min (pre testovaný materiál)
$v_{c15}$	[ $\text{m.min}^{-1}$ ]	Rezná rýchlosť pre trvanlivosť 15 min

$v_f$	[m.min <sup>-1</sup> ]	Rýchlost posuvu
$r_\epsilon$	[mm]	Polomer špičky rezného nástroja
$x_{Fc}$	[-]	Exponent vplyvu šírky záberu hlavného ostria
$x_{Ff}$	[-]	Exponent vplyvu šírky záberu hlavného ostria
$x_{Fp}$	[-]	Exponent vplyvu šírky záberu hlavného ostria
$y_{Fc}$	[-]	Exponent vplyvu posuvu
$y_{Ff}$	[-]	Exponent vplyvu posuvu
$y_{Fp}$	[-]	Exponent vplyvu posuvu
$K_r$	[°]	Uhol nastavenia hlavného ostria
$\gamma_o$	[°]	Nástrojový ortogonálny uhol čela
$\lambda$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivosť konkrétneho materiálu
$\lambda_s$	[°]	Nástrojový uhol sklonu hlavného ostria
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	Hustota konkrétneho materiálu

**ZOZNAM PRÍLOH**

- Príloha 1      Snímky opotrebovaných rezných hrán.
- Príloha 2      Snímky generovaných tvarov triesok.
- Príloha 3      Atest použitého referenčného materiálu.
- Príloha 4      Snímky z obrábania referenčného materiálu.
- Príloha 5      Ukážka priebehu rezných síl v softvéri DynoWare.
- Príloha 6      Priebeh zložiek rezných síl v čase pre  $v_c = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .
- Príloha 7      Závislosti rezných síl na čase reznej hrany v reze.
- Príloha 8      Metalografické snímky UmCo50.



## PRÍLOHA 1 – Snímky opotrebovaných rezných hrán



Snímka chrbtovej a čelnej časti VRD 2  
(testovacia rýchlosť  $40 \text{ m.min}^{-1}$ , rezná hrana na konci trvanlivosti).

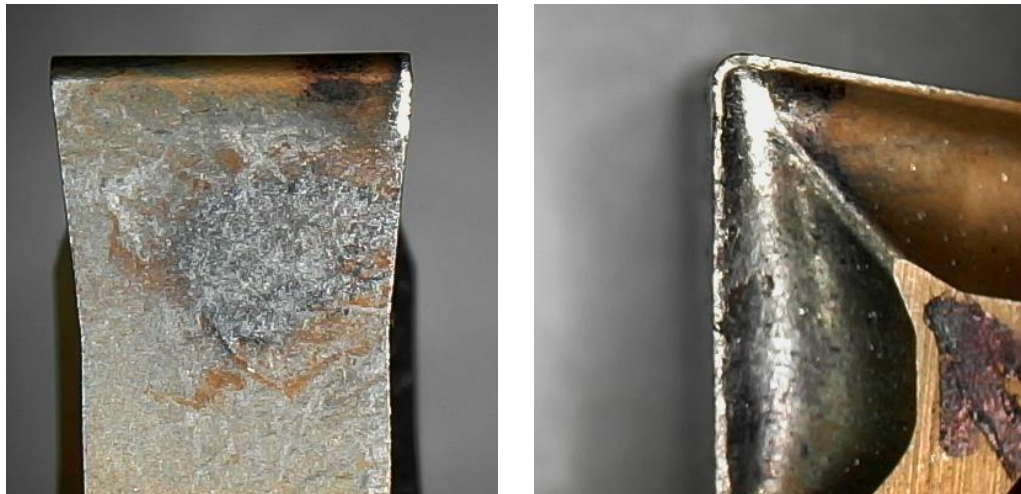


Snímka chrbtovej a čelnej časti VRD 3  
(testovacia rýchlosť  $40 \text{ m.min}^{-1}$ , rezná hrana na konci trvanlivosti).

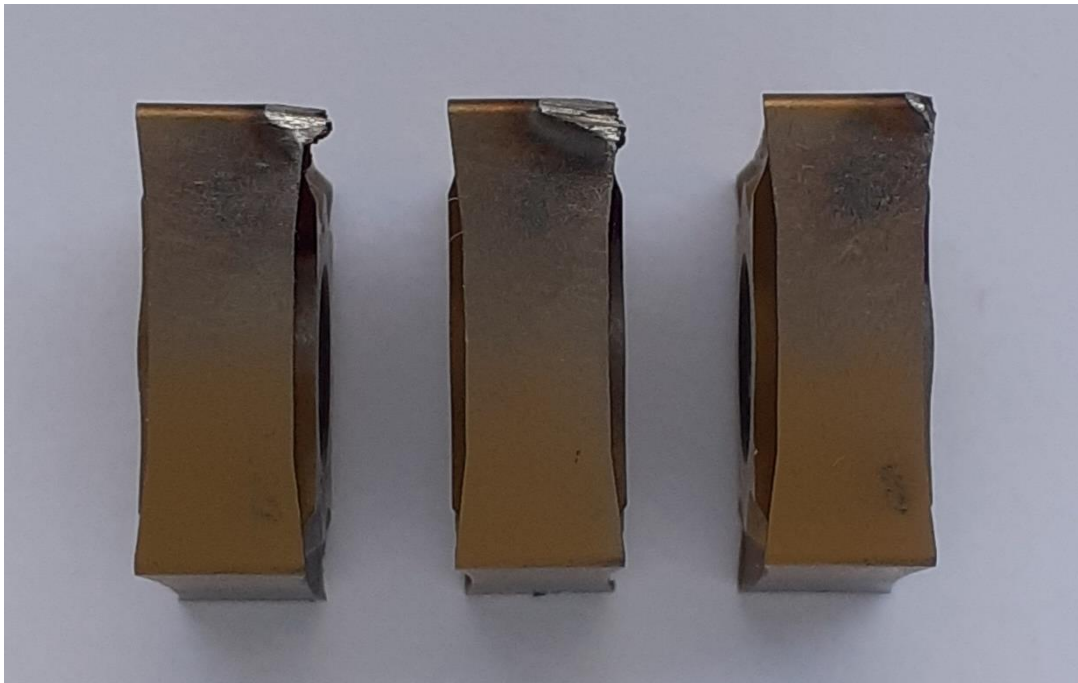


Snímka chrbtovej a čelnej časti VRD 1  
(testovacia rýchlosť  $50 \text{ m.min}^{-1}$ , rezná hrana na konci trvanlivosti).

## PRÍLOHA 1 (pokračovanie) – Snímky opotrebovaných rezných hrán



Snímka chrbtovej a čelnej časti VRD 2  
(testovacia rýchlosť  $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , rezná hrana po cca 10 min).



Snímka chrbtových častí VRD (testovacia rýchlosť  $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , rezná hrana na konci trvanlivosti, VRD 1 – vľavo, VRD 2 – v strede, VRD 3 – vpravo).

## PRÍLOHA 2 – Snímky generovaných tvarov triesok



Tvar triesky pri sústružení testovacou rýchlosťou  $40 \text{ m.min}^{-1}$  – počas prvého prejazdu (ku koncu trvanlivosti reznej hrany bol tvar triesok podobný ako u  $50 \text{ m.min}^{-1}$ ).



Tvar triesky pri sústružení testovacou rýchlosťou  $50 \text{ m.min}^{-1}$  (pri prvom prejazde – vľavo, ku koncu trvanlivosti reznej hrany – vpravo).



Tvar triesky pri sústružení testovacou rýchlosťou  $80 \text{ m.min}^{-1}$  (pri prvom prejazde – vľavo, ku koncu trvanlivosti reznej hrany – vpravo).



## PRÍLOHA 2 (pokračovanie) – Snímky generovaných tvarov triesok



Tvar triesky pri sústružení testovacou rýchlosťou  $40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$   
( $f = 0,05 \text{ mm}$  – vľavo,  $f = 0,3 \text{ mm}$  – vpravo).


### PRÍLOHA 3 – Atest použitého referenčného materiálu

<b>Inšpekčný certifikát 3.1, EN 10204</b> <small>(opis)</small>			
Dodací list č.:	21231600	Odberateľ :	Peter Prno
Dátum :	27.04.2021	Číslo :	04279
Popis výrobku :	Tyč kruhová	Priemer :	100 mm
Označení oceli :	C45+N	Tavba :	930332
Norma :	EN 10083-2; EN 10083-1:2006; EN 10060:2003		

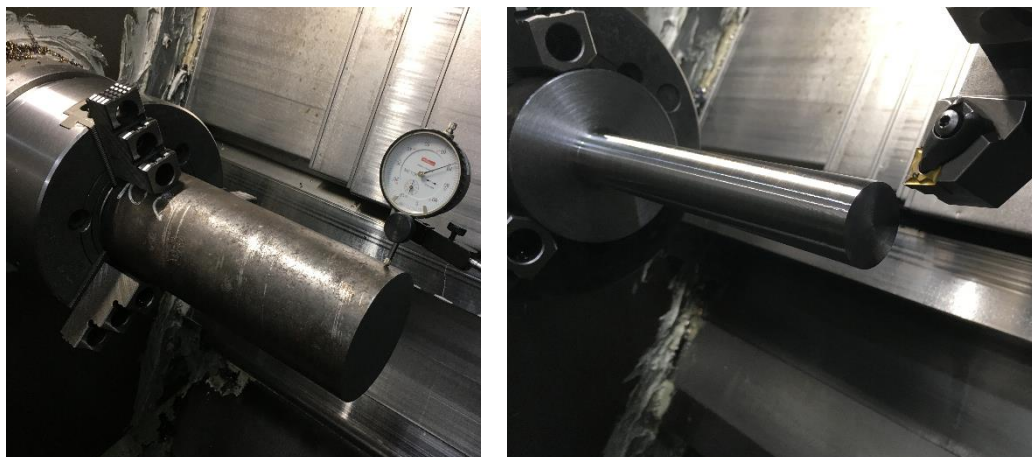
Chemické zloženie (%)									
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	V
0,44	0,74	0,195	0,011	0,020	0,03	0,03	0,015	0,002	0,002
Sn	As	Ti	Al	Al met	Nb	N	H2	O2	CEV
0,001	0,001	0,001	0,028	0,025	0,001	0,0072	1,8ppm	8ppm	0,5731

Mechanické hodnoty			
Medza klzu Re (Mpa)	Medza pevnosti Rm (Mpa)	Ťažnosť A5 (%)	Kontrakcie Z (%)
389	650	20,4	53,8

Prevodový pomer 10,7 x
Stav skúšania a dodania +N
Povrchové chyby EN 10221:1995 kl.B
Ultrazvuková skúška SEP 1920-1 kl.B gr.3
Dodržaná rádio izotopická aktivita taveného vzorku – max. 100 Bq/kg.

Dátum :	KNAPECSTEEL s.r.o., zaručuje, že uvedené hodnoty zodpovedajú originálu dodávateľa.	 tel./fax:00421/41 59 83 303 00421/918 399 698 www.knapecsteel.sk knapec@knapecsteel.sk
27.04.2021		

#### PRÍLOHA 4 – Snímky z obrábania referenčného materiálu



Tvar vzoriek referenčného materiálu 12 050.1 pred sústružením a počas sústruženia (polotovár vzoriek:  $\phi$  100 mm, dĺžka 250 mm).



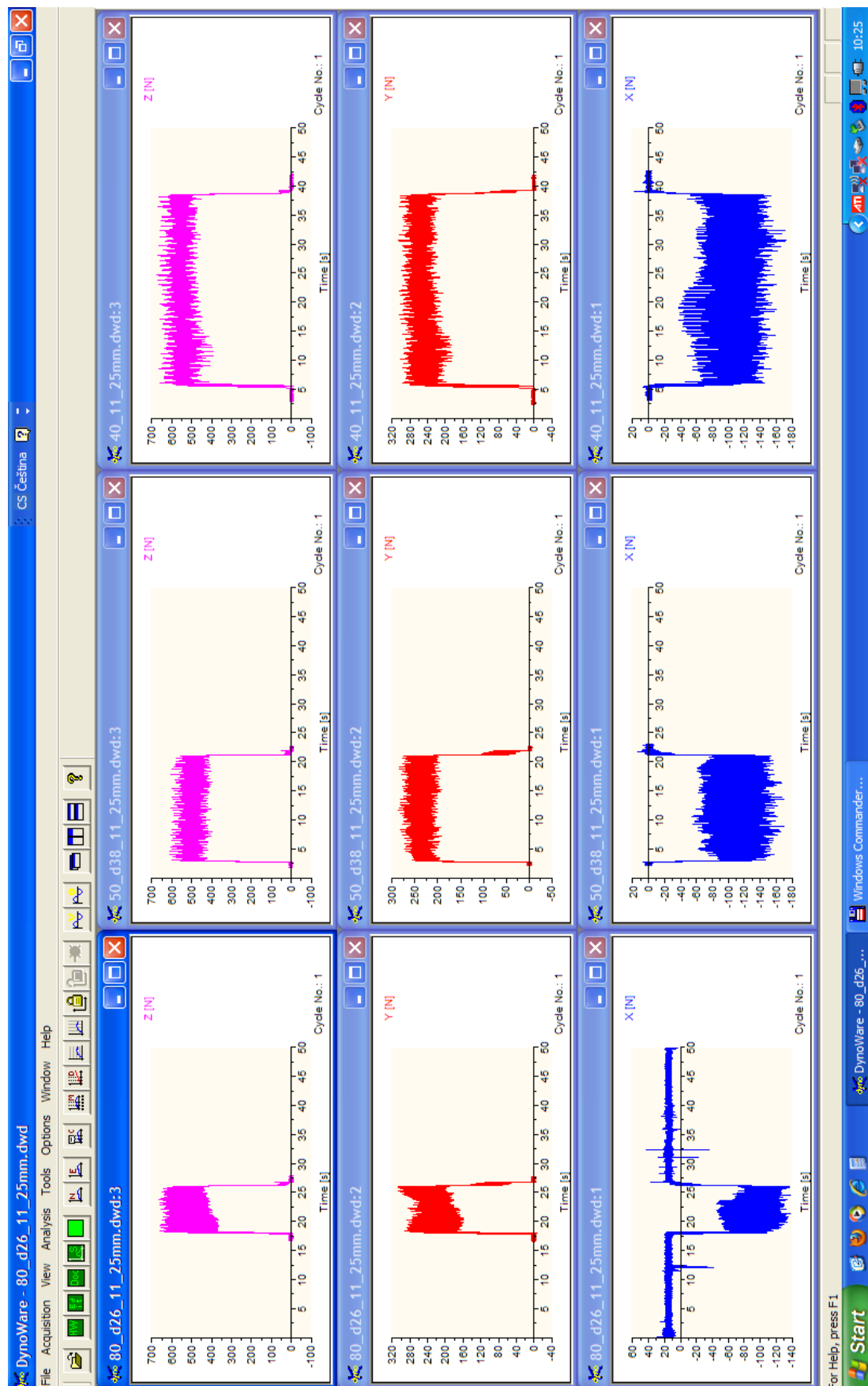
Generovaný tvar triesky pri sústružení vzorky referenčného materiálu (rezná rýchlosť  $310 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , pri prvom prejazde – vľavo, ku koncu trvanlivosti reznej hrany – vpravo).



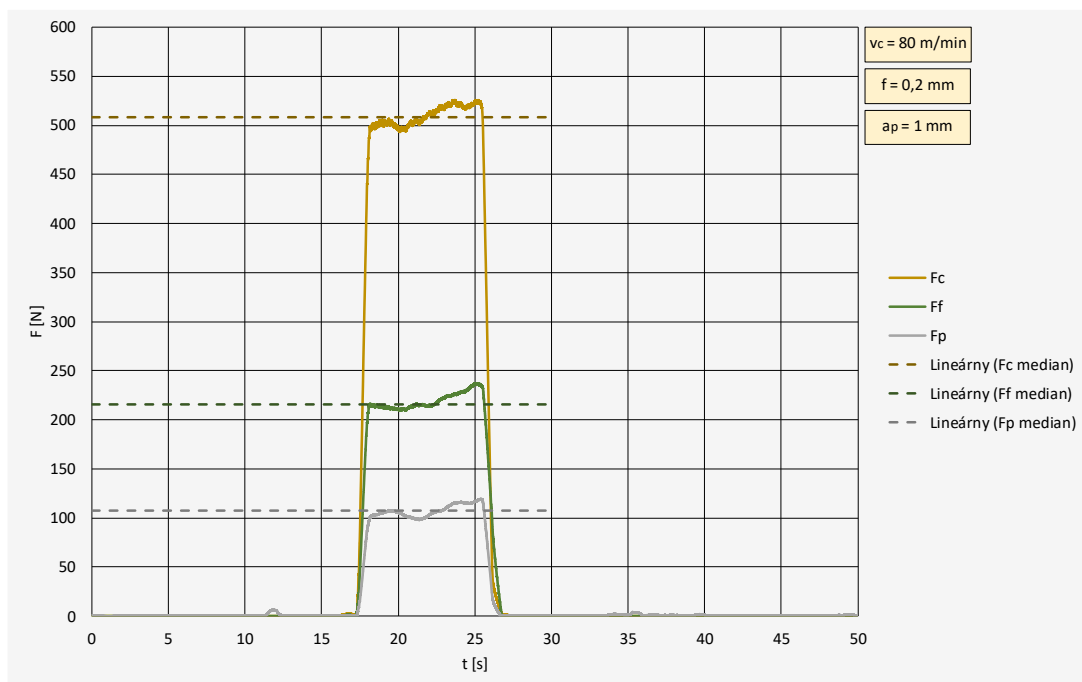
Snímka chrbtových častí vybraných, použitých VRD (rezné hrany na konci trvanlivosti,  $v_c = 260 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  – vľavo,  $v_c = 310 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  – v strede,  $v_c = 360 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  – vľavo).



## PRÍLOHA 5 – Ukážka priebehu rezných síl v softvéri DynoWare

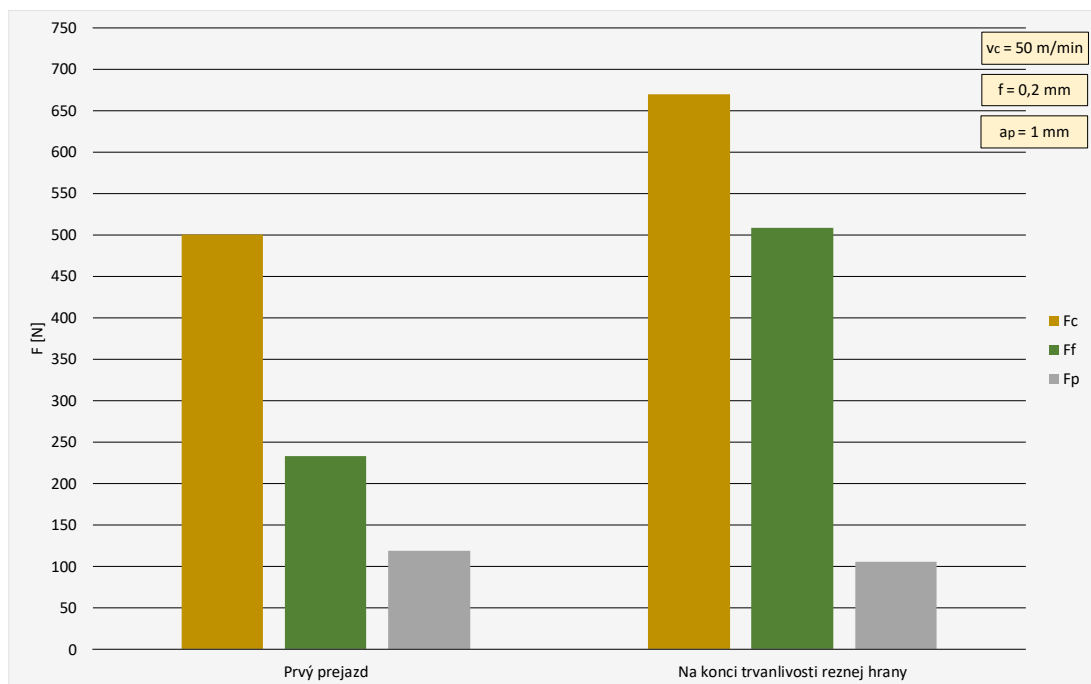


## PRÍLOHA 6 – Priebeh zložiek rezných síl v čase pre $v_c = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

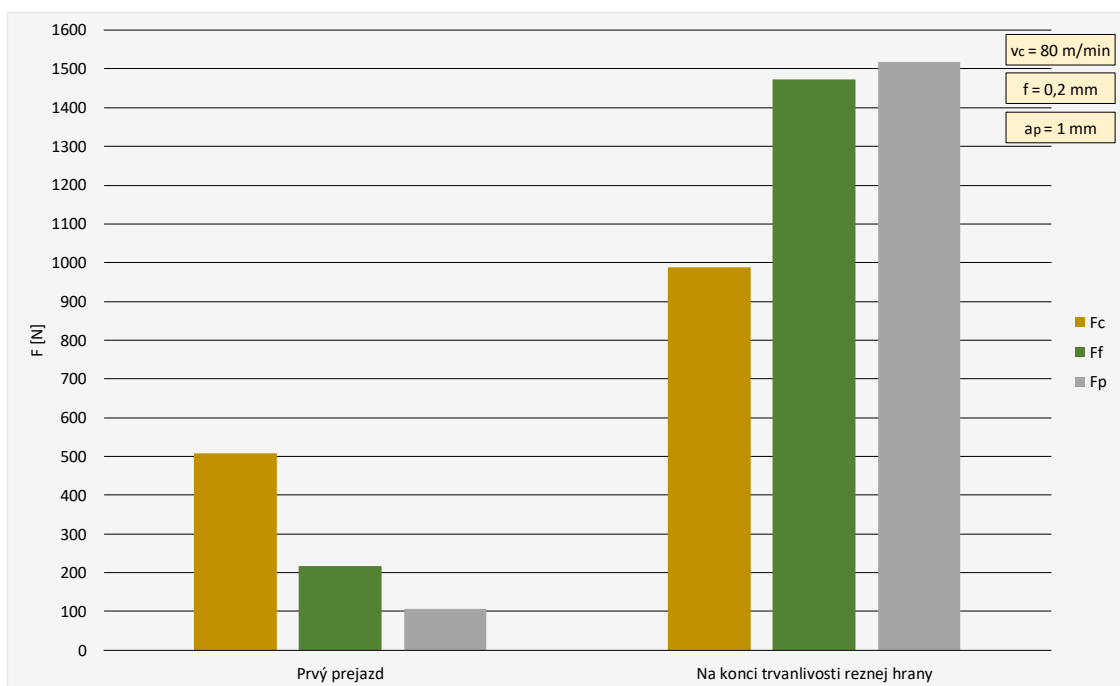


Priebeh zložiek rezných síl v čase ( $v_c = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , VRD 1, prvý prejazd).

## PRÍLOHA 7 – Závislosti rezných síl na čase reznej hrany v reze

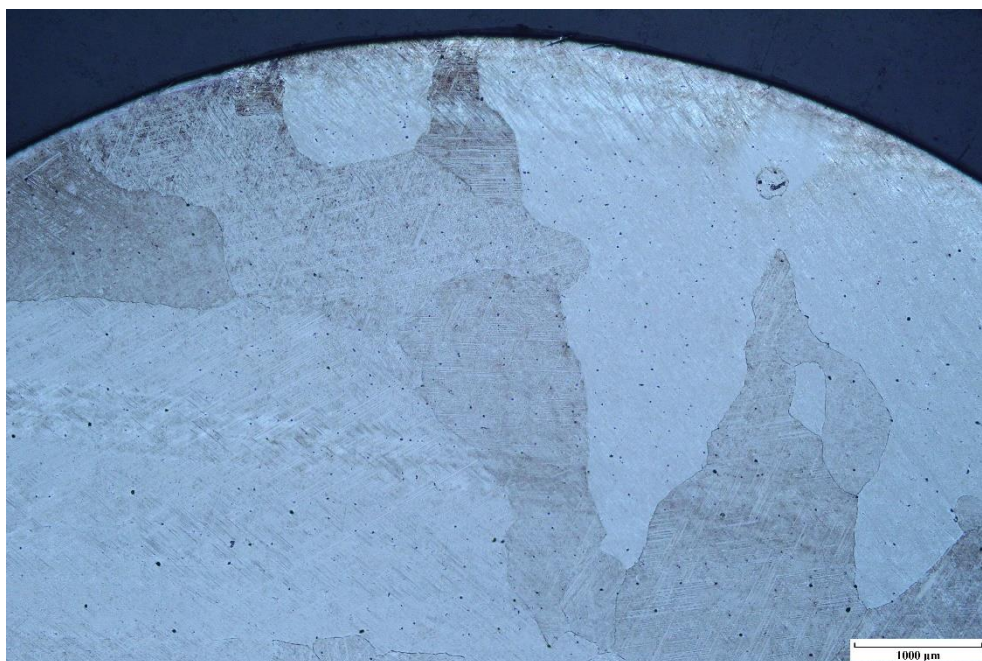


Závislosť veľkosti zložiek rezných síl na čase reznej hrany v reze ( $v_c = 50 \text{ m.min}^{-1}$ , VRD 1).

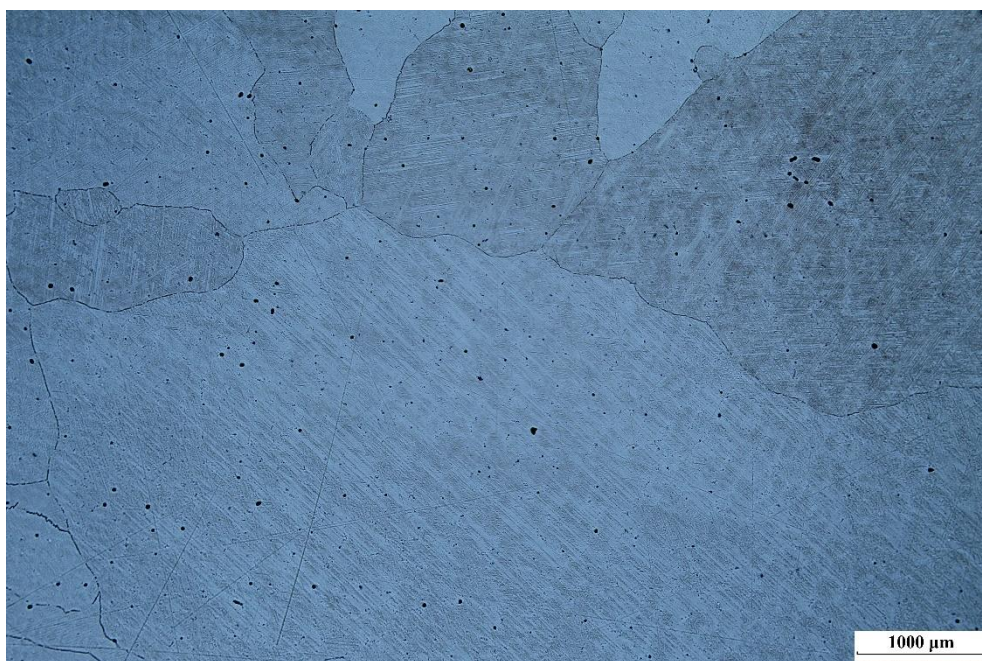


Závislosť veľkosti zložiek rezných síl na čase reznej hrany v reze ( $v_c = 80 \text{ m.min}^{-1}$ , VRD 1).

## PRÍLOHA 8 – Metalografické snímky UmCo50

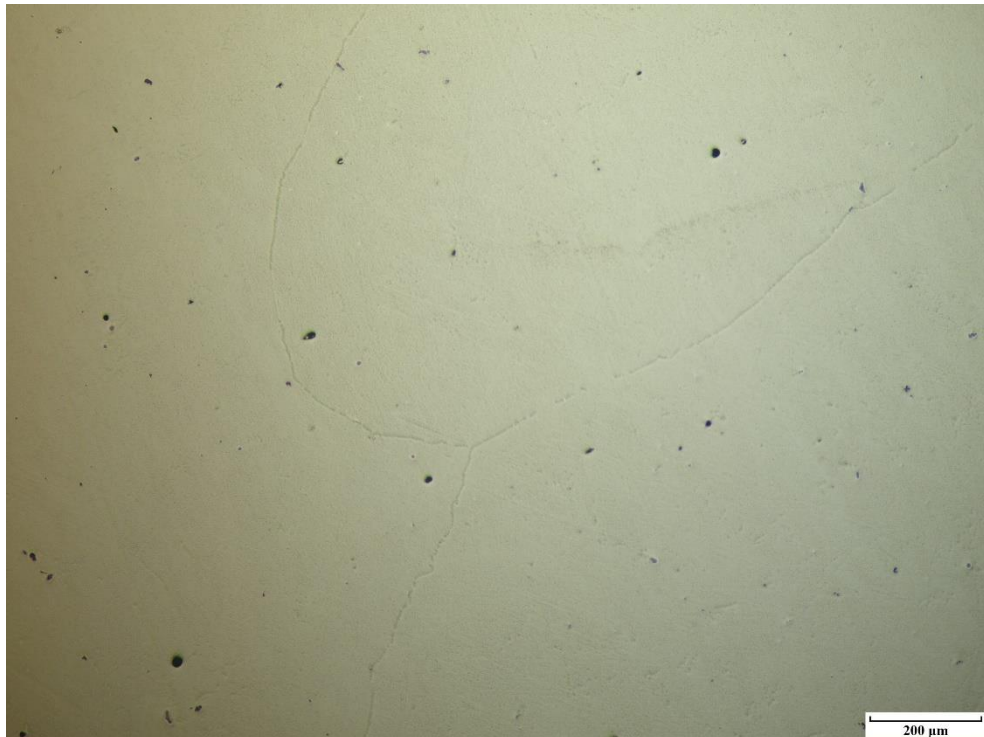


Snímka makroštruktúry UmCo50.

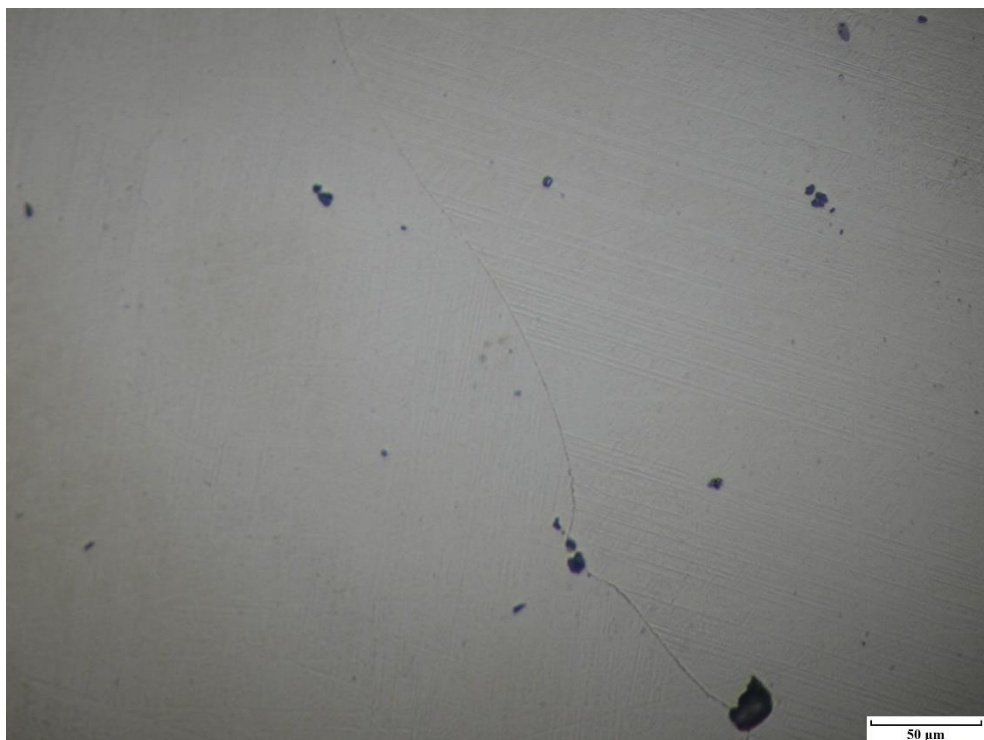


Snímka makroštruktúry UmCo50.

## PRÍLOHA 8 (pokračovanie) – Metalografické snímky UmCo50



Snímka mikroštruktúry UmCo50.



Snímka makroštruktúry UmCo50.

### Poznámky:

- vzorka bola pripravená po skončení testu obrobiteľnosti, zo zostatkového materiálu (valec cca  $\phi$  15 mm),
- zariadenie: svetelný mikroskop Neophot 32, výrobca Carl Zeiss.